

中国可持续 航空燃料 新图景

生物质 SAF 篇

2025年11月



AIRBUS 

引用建议与鸣谢

引用建议

中国可持续航空燃料新图景—生物质SAF报告, 空中客车, 落基山研究所, 2025, <https://rmi.org.cn/insights/study-on-chinas-landscape/>.

鸣谢

本报告研究和数据收集完成于2025年, 在调研和报告的起草过程中, 我们有幸得到来自政府主管部门、相关企业和研究机构的帮助。受益于他们提供的一手信息和专业意见, 本报告得以在生物质SAF和电制SAF未来发展图景方面进行充实系统的研究和分析, 特别感谢中国民用航空第二研究所副所长夏祖西、中国产业发展促进会生物质能分会副秘书长窦克军、中国国际经济交流中心能源与绿色低碳发展研究部部长景春梅对本研究项目的支持

目录

执行摘要	4
一、研究背景及 SAF 发展概览	5
1.1 SAF 对于全球航空碳减排的重要意义	5
1.2 全球 SAF 应用整体现状	6
二、全球 SAF 主要政策梳理及影响分析	7
2.1 中国政策解读	7
2.2 其他主要国家和地区政策解读	7
2.3 国际组织政策及机制解读	10
2.4 可持续标准与评价体系	10
三、生物质 SAF 的主要技术路线	13
3.1 技术简介、技术成熟度与发展现状	13
3.2 各技术路线可持续性分析	16
3.3 生物质 SAF 和电制 SAF 的区别与联系	18
四、中国及全球主要国家生物质 SAF 供给预测	20
4.1 全球主要国家生物质 SAF 产量潜力预测	20
4.2 全球主要国家生物质 SAF 成本构成分析	38
五、未来全球 SAF 市场供需趋势预测 -2030	50
5.1 中国在当前全球 SAF 市场中扮演的角色	50
5.2 2030 全球 SAF 供给侧趋势预测	51
5.3 2030 年全球 SAF 需求预测	52
六、主要结论与建议	54
附录 1 中国生物质 SAF 项目汇总	58
附录 2 美国生物质 SAF 项目汇总	60
附录 3 巴西生物质 SAF 项目汇总	62
附录 4 印度生物质 SAF 项目汇总	63
参考文献	64

执行摘要

在全球应对气候变化的大背景下，航空业作为碳排放增长最快的行业之一，正面临日益严峻的减排压力。国际民航组织（ICAO）提出，全球航空业到 2050 年需实现净零排放的目标，而可持续航空燃料（SAF）被视为实现这一目标的关键解决方案。生物质可持续航空燃料（Bio-SAF）作为 SAF 的主要技术路线之一，因其原料可再生、全生命周期低碳排放、技术相对成熟、成本相对可控的特性，受到各国政府、航空公司和能源企业的广泛关注。近年来，在各类政策支持力度持续加大的背景下，全球生物质 SAF 市场规模快速扩大、技术路线不断优化，但同时生物质 SAF 发展也面临着原料供应紧张、生产成本偏高等方面的挑战。

中国作为全球最大的航空市场之一，同时拥有着丰富的生物质资源，在生物质 SAF 产业发展方面展现了巨大潜力。近年来，中国政府陆续出台多项政策支持 SAF 的研发与应用，并设定了明确的发展目标。与此同时，美国、巴西、印度等全球主要生物质能源生产国也在加速推进 SAF 产业化进程，大力推广生物质 SAF 的供给与应用。在此背景下，本报告系统梳理了全球生物质 SAF 的技术发展现状、市场动态、发展趋势、政策环境、市场供需关系等，并重点针对中国、美国、巴西和印度四国的生物质 SAF 资源禀赋、产业规模和成本构成进行了评估。基于以上内容，报告进而分析了中国在 SAF 领域的角色和未来发展方向，旨在为行业决策者、政策制定者和投资者提供参考依据。

研究认为，得益于中国丰富的生物质原材料资源以及完善的化工产业体系，中国在生物质 SAF 生产成本及潜在生产规模两方面均处于领先地位。随着未来几年中中国生物质 SAF 产能逐步上线投产，中国在未来生物质 SAF 市场中的重要性将持续提高。基于这一观点，研究得出以下主要结论和建议：

- 2030 年前 HEFA 仍将是市场主流技术路线，2030 年后 AtJ、GFT 等技术路线将逐步加速发展。而中国作为各类原材料的最大产生国和供应国，未来有望成为全球 SAF 供给中心，为全球航空业减排提供基础保障。
- 受需求上升和政策变动影响，SAF 市场的不确定性增强，未来短期内全球 SAF 市场格局将出现波动。此时，积极的政策信号是稳定市场信心的重要基础，同时有针对性的价格机制、财税工具和产业创新基金等措施也能起到加速 SAF 产业布局的重要作用。
- 大力发展 SAF 产业不仅是中国航空业节能减排的重要抓手，也是新时代促进经济发展并带动社会就业的新动力，随着中国在全球 SAF 市场中的重要性逐步提升，SAF 产业能够成为新的经济增长点。
- 搭建并完善 SAF 可持续性认证机制，与国际主流标准深入衔接有助于发挥中国 SAF 生产能力的优势，扩大市场。同时，推进创新交易模式、盘活市场并带动本土 SAF 消费和生产积极性能够助力中国 SAF 市场快速发展。

一、研究背景及SAF发展概览

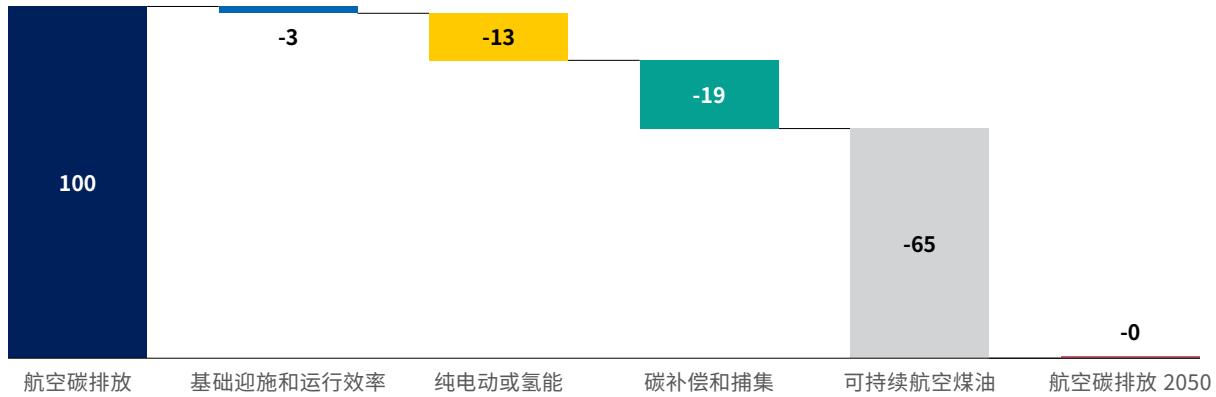
1.1 SAF 对于全球航空碳减排的重要意义

在全球经济持续发展和人民生活水平日益提升的背景下，航空运输在客运和货运方面的重要性与日俱增。然而，这种增长也带来了严峻的环境挑战。在过去二十年间，全球航空业的年均碳排放增速高达 2.5%，2010 至 2018 年间更是攀升至 4.0%，¹ 远超公路等其他交通领域。尽管 2023 年航空业碳排放量仅占全球总量的 2.5%。² 但国际民航组织 (ICAO) 预测，如果航空业不采取任何碳减排措施，到 2050 年，航空碳排放占比可能飙升至 25%。³ 因此，加速推进航空领域的碳减排已刻不容缓。

与其他主要行业（如电力、工业、建筑及地面交通）在节能减排方面已取得长足进展不同，航空业因其运营特性，减排方案和路径选择相对有限，被公认为“难减排”领域之一。在这一背景下，可持续航空燃料 (SAF) 因其理化性质接近传统航煤、可与现有航空基础设施兼容，并具备显著的生命周期碳减排潜力，为航空业的绿色转型给出了关键的解决方案。

受经济规模、人口基数等因素的驱动，全球航空业的运输周转量、旅客运输量、货邮运输量仍将保持持续增长态势。据空客公司预测，在未来 20 年，全球航空业收入客公里指标 (Revenue Passenger Kilometer, RPK) 将以每年 3.6% 的速度增长。这意味着 2043 年前，全球大约需要 42430 架新飞机。⁴ 照此发展，航空业在 2050 年实现净零目标将面临非常严峻的挑战。

图表 1 国际航空运输协会 (IATA) 对 2050 年时航空技术路径减排贡献的预测 (%)



如图表 1 所示，在航空业的多种减排技术路径中，采用可持续航空燃料 (Sustainable Aviation Fuel, SAF) 替代传统航空煤油，被公认为是最为有效的减排方式之一。该路径有望使航空碳排放量在 2019 年的基础上减少 65%。SAF 是指符合可持续标准的，由可再生 / 废弃物制成的航空燃油。⁵ 其原料包括废弃油脂、城市废弃物、农林废弃物、能源作物以及可再生电力等等。相比于其他减排方案，SAF 主要有三个优势：

1) 理化性质与传统燃料相近，SAF 可与现有的化石航空燃料按一定比例混合（当前标准下最高可达 50%），并可作为一种即加即用燃料 (Drop-in Fuel) 直接用于现有的飞机和燃油供应系统，无需大规模改造飞机或机场燃油基础设施。同时，不同于仍处于研发阶段的氢能飞机和电动飞机，SAF 的性能表现与传统航空燃料无异，可以直接应用于现有的商业航班并在未来氢能飞机和电动飞机实现商业运营后仍然会发挥重要的脱碳作用。

2) 生命周期减排效果显著：SAF 的原料来自于废弃油脂、农林废弃物、工业排放及空气捕集 CO₂ 和城市固体废弃物等，在生命周期内可实现 10%–100% 的碳减排，⁶ 特别是通过电转液 (PtL) 技术，以可再生电力制氢和二氧化碳为原料合成的 SAF，理论上可实现 100% 减排。

3) 包含多种技术路线，适应不同国家和发展阶段：SAF 的生产方式非常多样，例如既可以使用废弃油脂加氢技术、生物质气化 + 费托合成（下文以 GFT 代表）、醇制 SAF 等技术生产，也可以利用绿色电力生产 eSAF。各种生产技术路线的技术成熟度不同，使用的原料不同，供应能力也不同，全球各主要航空燃料市场都可以根据本国的自然禀赋找到较为适宜的技术路线发展 SAF 产业，并根据市场发展阶段调整发展方向。

1.2 全球 SAF 应用整体现状

近年来，SAF 在全球的产量、应用和产业参与度呈现出快速发展的态势，成为推动航空业绿色转型的重要抓手。

在全球减排要求持续收紧与航空公司可持续发展战略的共同推动下，全球 SAF 产量和产能不断增长。据国际航空运输协会 (IATA) 统计，2024 年全球 SAF 产量已达到 12.5 亿升，约合 100 万吨，较 2023 年实现翻倍增长，呈现出强劲的发展势头。⁷ 而根据 ICAO 统计，截至 2025 年 6 月，全球已有超过 468 个 SAF 项目（包括投产 / 在建 / 规划），覆盖 60 个国家，预期产能超过 3500 万吨。⁸

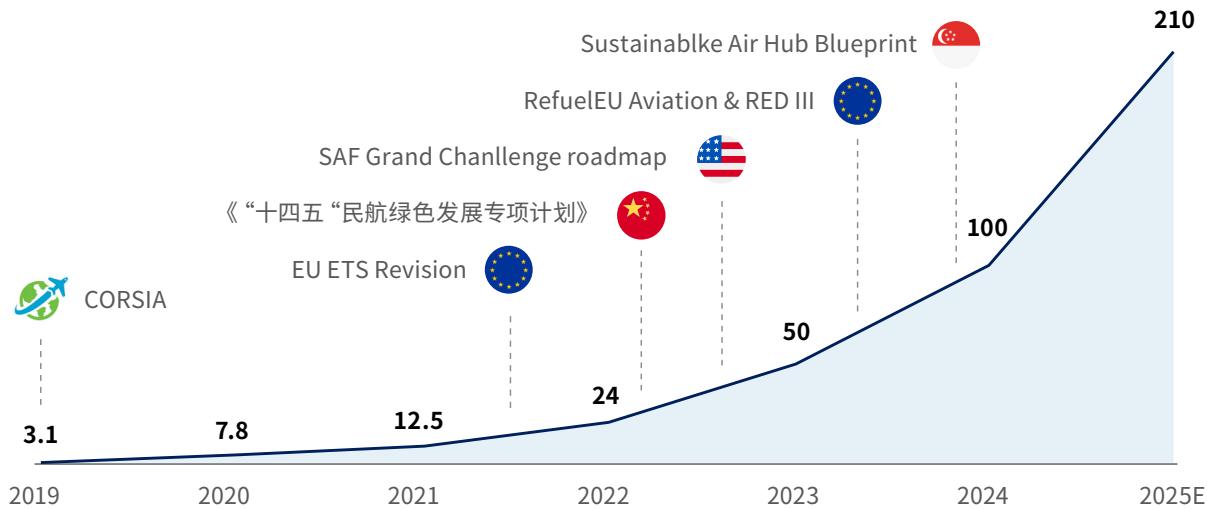
在实际应用方面，SAF 正逐步从示范性项目走向商业化应用，成为航空公司减排战略的重要组成部分。截至 2025 年 5 月，全球已有超过 85 万架次商业航班成功使用 SAF，充分验证了其在运行安全性和技术适配性方面的可行性和可靠性。⁹ 此外，全球已有超过 40 家航空公司签署了 SAF 自主需求承诺，结合未来的政策性强制加注需求，全球到 2030 年自主使用总量约为 1400 万吨，为 SAF 产业提供了长期稳定的市场预期。¹⁰

值得关注的是，整机制造商与发动机企业也在积极布局 SAF 产业，在技术支持、扩大应用等方面发挥着关键作用。其中空客牵头成立了总额约 2 亿美元的 SAF 融资联盟（合作方包括法航、荷航、澳航、法国巴黎银行等）旨在助力 SAF 生产端的提升并匹配航司的需求。¹¹ 2024 年，空客的全球航空燃料使用中，可持续航空燃料 (SAF) 的占比已提升至 15%，并计划在 2030 年将这一比例提高到 30% 以上。¹² 在发动机领域，罗尔斯 - 罗伊斯 (Rolls-Royce)、赛峰等主流发动机制造商联合整机制造商已完成现有发动机型号的 SAF 兼容性测试，并开展了 100% SAF 的飞行测试。¹³

二、全球 SAF 主要政策梳理及影响分析

由于 SAF 的生产成本仍远高于传统航煤，且其技术和市场推广均需要持续的资金投入，因此来自政府和国际机构层面的法规支持和经济激励措施对于 SAF 的发展而言至关重要。中美欧等主要航空市场目前均针对 SAF 的推广和应用出台了相关政策，对 SAF 的发展起到了关键作用。

图表 2 全球SAF产量(万吨/年)及主要政策节点。



产量数据来自IATA

2.1 中国政策解读

中国航空业仍处于快速发展阶段，民航碳排放呈持续上升趋势，相较于发达国家面临更大的减排压力。因此，中国政府出台了多项政策支持 SAF 产业的发展。2022 年发布的《“十四五”民航绿色发展专项规划》中首次提出了力争“十四五”期间 SAF 消费量达到 5 万吨、2025 年当年达到 2 万吨的目标；2024 年发布的《关于大力实施可再生能源替代行动的指导意见》也强调了发展可持续航空燃料的重要性。

2024 年，中国还发布了《航空燃料可持续性评价规范》征求意见稿，首次明确了 SAF 的可持续性标准。同样在 2024 年，中国正式启动 SAF 试点应用工作。试点分多个阶段进行，涵盖国航、东航、南航等航司以及北京大兴、成都双流等多个机场，初期聚焦供油保障与质量控制，后续将扩大试点范围，实现对国内航班的小比例常态化加注。

2.2 其他主要国家和地区政策解读

2.2.1 欧盟

为加快实现航空业的绿色转型，欧盟在“Fit for 55”框架下颁布了多项法案，其中以 RefuelEU Aviation 法规和 EU ETS（欧盟碳排放交易体系）最为核心。

EU ETS 通过“总量控制与配额交易”（Cap and Trade）的市场化机制，设定碳排放总量上限并分配可交易配

额，配额交易所收缴的资金将用于支持缩小 SAF 与传统航煤之间的成本差。为逐步深化转型，欧盟自 2024 年起逐步缩小免费配额比例，并规定在 2026 年以后不再提供免费配额，且计划将进出欧盟的航线也纳入 EU ETS 的管理范围。ReFuelEU Aviation 则以行政化手段，强制要求提高航空公司使用 SAF 的比例。该法规要求自 2025 年起，航空燃料供应商必须确保其提供的燃料中包含一定比例的 SAF，且该比例每五年提高一次。具体目标是：到 2025 年，SAF 的混合比例达到 2%；到 2030 年，增加至 6%；到 2050 年，SAF 的比例将达到 70%。同时政策也对非生物质燃料 (RFNBOs) 的用量做出了强制要求，要求电制 SAF 的掺混比例在 2030 年后逐步提高，到 2050 年达到 35%。此外，该政策还对 SAF 的全生命周期排放有所考量，规定需评估 SAF 的原料来源、生产所造成的间接土地利用变化 (Indirect Land Use Change, ILUC) 等多项环境影响，以确保 SAF 的可持续性。

图表 3 欧盟SAF相关政策一览

FF55 政策提案名称	政策提议	原有政策	FF55 政策提案方案	2025 年现状
欧洲碳排放交易体系 (ETS) 更新	扩大 ETS 在航空领域覆盖范围	欧洲内部航线	2027 年视情况可能扩大至来往欧洲航线	欧洲内部航线
	减少 ETS 免费碳配额比例	85%	2026 年后不再提供免费配额	50%
	使用 ETS 资金支持 SAF 产业	无	使用 ETS 收入补贴 SAF 生产企业，预计总额 16 亿欧元	暂无信息披露资金使用情况
	为 SAF 提供免费排放许可	无	2024 年起额外对使用 SAF 的航司提供免费排放许可	已开始提供
RefuelEU Aviation 提案	强制要求航空燃料供应商掺混使用 SAF	无	2025 – 2050 年间掺混比例从 2% 逐步提高至 70%	2%

2.2.2 美国

美国作为全球最大的航空市场，占据约四分之一的全球航空活动，对 SAF 的政策支持体系也相对完善。2021 年发布的《美国航空业气候行动计划》明确了航空业 2050 年碳中和的目标，随后出台的《SAF 大挑战路线图》(SAF Grand Challenge Roadmap) 设定了 2030 年年产 900 万吨、2050 年年产 1 亿吨的 SAF 产量目标，为 SAF 的发展确定了基本发展方向和目标。

美国还在联邦和州政府层面，通过市场机制、财政补贴等手段来促进 SAF 的生产与应用。在市场化机制方面，美国环保署推出的《可再生燃料标准》(RFS) 与加州等地实施的《低碳燃料标准》(LCFS) 允许航空燃料企业通

过 SAF 使用生成可交易的 RIN 信用额度，并通过售卖 RIN 获取收益来抵消部分成本溢价。¹⁴ 在财政激励方面，联邦层面以近期通过的《大而美法案》45Z (2025 年及以后) 条款对碳排放低于 50kg CO₂/MMBtu (约等于 49g CO₂/MJ) 的 SAF 提供阶段性税收抵免，额度依据燃料生命周期减排能力浮动，形成直接的经济激励。按照 2025 年 7 月 4 日实施的《大而美法案》最终的内容，激励分为两个阶段：2025 年 1 月 1 日至 12 月 31 日期间所产的 SAF，SAF 按照《通胀削减法案》原有规定将获得 \$1.75 * 减排系数 / 加仑的税收减免；2026 年 1 月 1 日至 2029 年 12 月 31 日期间所产的 SAF，按照《大而美法案》规定，SAF 将与其他清洁燃料一样获得 \$1 * 减排系数 / 加仑的税收减免。此外，《大而美法案》还额外进行了几处调整，主要包括：(1) 放宽了 45Z 条款 2025 年 1 月 10 日新加入的“进口 UCO 无法使用 45ZCF-GREET 模型 (进而难以获得减免)”的要求，允许使用来自美国、加拿大、墨西哥的原料，该条款 2026 年起生效。(2) 不再考虑间接土地利用变化所导致的温室气体排放；该条款 2026

年起生效 (3) 如果纳税企业属于几类外国实体 (foreign entity) , 则不能享受税收抵免优惠。此条款在《大而美法案》通过时即刻生效。¹⁵

除以上主要政策外, 部分州政府还推出了专门针对 SAF 生产与应用的税收减免政策, 例如明尼苏达州、华盛顿州提供生产端激励, 伊利诺伊州则对应用端实施优惠等。

图表 4 美国SAF政策一览

	政策措施/目标	生效时间
《通胀削减法案》 IRA 及《大而美法案》 OBBC	对使用 SAF 的企业提供税务减免。每加仑 SAF (约 3kg) 可抵税 1.25–1.75 美元	2023–2024
	对 SAF 生产企业提供税务减免。每加仑 SAF 可抵 (\$1.75* 减排系数) 美元	2025
	对 SAF 生产企业提供税务减免。每加仑 SAF 可抵 (\$1 * 减排系数) 美元	2026–2029
可持续燃料标准 RFS、 LCFS 等	类似于碳市场。燃料供应商在本土销售可持续航空燃料将会产生环境效益, 可进入市场进行交易。除了全球通行的 RFS 市场外, 加州等地也有自己的 LCFS 市场, 与 RFS 并存	长期有效
《可持续航空燃料大挑战 路线图》	本土产量达到 30 亿加仑 (900 万吨)	2030
	本土产量达到 350 亿加仑 (超 1 亿吨)	2050

2.2.3 英国

为实现 2050 年航空业净零排放目标, 英国政府推出了《净零航空战略》(Jet Zero)、《SAF 强制配额计划》(SAF Mandate)、英国碳排放交易体系 (UK ETS) 等多项政策文件, 提出要将 SAF 作为英国航空业脱碳的核心技术路径大力发展。

2022 年 7 月, 英国交通部发布的《净零航空战略》为应对航空业脱碳发展挑战、实现 2050 年净零碳排放愿景制定了明确的框架与规划。2024 年 4 月, 英国政府发布了《SAF 强制配额计划》, 要求自 2025 年起所有英国起飞航班的燃料中至少掺混 2% 的 SAF, 并在 2030 年提高至 10%、2040 年增至 22%, 预计可分别减排 270 万吨和 630 万吨 CO₂。该政策还引入了可交易的减排证书体系, 要求 SAF 相较传统航油减排至少 40%, 并鼓励发展如 PtL 等多元化技术路径, 以降低对有限原料的依赖。此外, 政策设立了买断机制, 允许未履约的供应商以固定价格 (普通 SAF 为 4.7 欧元 / 升, PtL 为 5 欧元 / 升) 完成合规, 以降低市场波动对投资的影响, 但强调该机制仅为过渡性手段, 无法替代实质性减排。¹⁶ 在 ETS 体系下, 航空公司可以通过使用符合减排标准的合格 SAF 来申请减排额度 (Emission Reduction Claims) , 抵消部分该航司在 ETS 机制下的减排义务。

此外, 英国正计划引入“收入确定性机制” (Revenue Certainty Mechanism) , 以提升 SAF 产业的投资吸引力。在该机制下, SAF 生产商将与政府控股的经营公司签署合同, 设定执行价格: 当市场价格低于执行价格时, 经营公司承担差额; 反之, 则由生产商向经营公司支付销售差价。该机制将有效缓解 SAF 投资中面临的价格不确定性问题。¹⁷ 根据目前的计划, 该机制将于 2026 年正式实施。

2.2.3 巴西

为了促进航空业减排，巴西在 2024 年推出了“国家航空生物质燃料计划”ProBioQAV，计划要求所有航空公司通过应用 SAF 来减少巴西本土航线的碳排放，减排比例将从 2027 年的 1% 起逐渐增加到 2037 年的 10%。根据 EPE 估计，这一计划将在 2030 年带来 11.7-35.6 万吨的 SAF 需求，取决于 SAF 燃料的具体碳排放值。

2.2.4 印度

为实现国家自主贡献目标，并提升本国生物燃料产业竞争力，印度在 SAF 领域推出了掺混政策。2023 年，印度国家生物燃料协调委员会 (NBCC) 设定了分阶段的掺混目标：到 2025 年，国内航班的 SAF 掺混率达到 1%，到 2030 年提升至 5%。另外，印度石油和天然气部对国际航班也设定了目标：2027 年掺混率达 1%，并于 2028 年提高至 2%。

2.2.5 新加坡

为加快推动航空业脱碳转型，新加坡将于 2026 年起开始执行一系列的政策和措施推动可持续航空燃料的应用。具体包括：从 2026 年开始，所有从新加坡离境的航班都须强制使用 1% 掺混比例的 SAF，其长期目标是在 2030 年前将这一比例提升至 3%-5%。为此，新加坡会向离境航班的乘客征收 SAF 使用费，该费用的数额将根据航程和仓位来确定。这笔费用将会用于新加坡民航局实施的 SAF 集中采购，通过规模化采购锁定需求，降低 SAF 成本，并保证在新加坡运营的航空公司以相对公平的价格获得 SAF。这些即将执行的政策措施有助于新加坡率先构建绿色燃料保障体系，并将自身建设成为全球可持续航空枢纽。¹⁸

2.3 国际组织政策及机制解读

航空业具有高度全球化的特性，国际政策框架对于推动其减排至关重要。ICAO 和 IATA 是该领域最核心的两个机构。

ICAO 作为联合国下属机构，负责确保国际民用航空的安全、有序、高效、经济可行且对环境负责的发展。ICAO 主要通过 CORSIA（国际航空碳抵消和减排计划）推动行业脱碳，鼓励航司使用 SAF 以减少对碳抵消的依赖。CORSIA 将分阶段实施，目前已进入第一个正式阶段，并计划自 2027 年进入强制阶段，针对 SAF，CORSIA 并未设定任何强制使用目标，而是通过量化航空公司实际使用的低碳燃料ⁱ相对于化石航煤基准排放值所带来的生命周期减排效益，在 CORSIA 机制下抵扣相应义务，从而鼓励 SAF 的使用。此外，CORSIA 还明确了 SAF 的可持续性认证门槛，规定合规的燃料相比于传统航煤必须至少实现 10% 的减排水平，同时还引入了碳汇、土地等其它 13 项可持续标准。¹⁹

IATA 作为全球航空公司行业协会，并不具备制定强制性政策的权力，因此主要借助市场化和倡导性手段来推动 SAF 的发展与应用。为加速这一进程，IATA 联合了航空公司、燃料生产商、金融机构等利益相关方作出了多种努力，如签署了飞向净零（Fly Net Zero）承诺、成立了民航脱碳组织（Civil Aviation Decarbonization Organization, CADO），这些举措旨在促进技术创新、降低成本并扩大产能，共同推动 SAF 市场的规模化发展。²⁰

2.4 可持续标准与评价体系

SAF 必须满足一定的可持续性标准，以确保其在环境、社会和经济维度上符合可持续发展目标。全球范围内，尽管不同机构和政策框架对 SAF 的可持续性定义存在差异，但全生命周期的减排效果与原料的可持续性始终是关注核心。全球范围内较为权威的是 ICAO 的 CORSIA 机制和欧盟《可再生能源指令》的可持续性标准，中国也在着手建立适应自身国情和减排目标的 SAF 可持续性标准。

ⁱ 此处低碳燃料指 CORSIA 合规燃料 (CORSIA Eligible Fuels)，包括 SAF。

- **国际航空碳抵消和减排计划 (CORSIA)**

CORSIA 由 ICAO 主导, 是目前国际航班使用 SAF 的核心标准。根据 2022 年 11 月更新的版本, 该标准针对 SAF 的可持续性标准共包含 14 个具体指标, 分别是温室气体排放、土地碳汇、减排表现、水、土地、空气、生态保护、废弃物和化学品、震动效应、人权与劳动者权利、土地利用、用水权、当地社会发展、粮食安全。²¹ CORSIA 明确规定, SAF 的全生命周期碳排放必须至少比传统航空燃料 (基准值为 89g CO₂e/MJ) 减少 10%。此外, 该标准强调应全面评估直接和间接土地利用变化对碳排放的影响, 并要求所使用的生物质原料不得来自具有高碳储量的土地, 例如原始森林、湿地和泥炭地, 以防止碳汇破坏和不可逆生态影响。

CORSIA 还特别关注土地变化所导致的碳排放的真实性与可监测性, 要求相关排放必须可量化、可追踪, 并能够被有效补偿, 防止因碳捕集与封存 (CCS) 等技术不确定性带来的“隐性排放”风险。在执行层面, 该标准要求整个 SAF 生产与供应链具备透明的可追溯机制, 通常需通过 ISCC、RSB 等国际认证体系来验证其可持续性表现。

- **欧盟《可再生能源指令》 (Renewable Energy Directive, RED)**

RED 是欧盟委员会发布的关于可再生能源推广和使用的主要法规, 涵盖欧盟市场的所有 SAF 产品, 并设有强制性的可持续性合规要求。该指令规定, SAF 的全生命周期碳排放必须显著低于化石航空燃料 (基准值为 94g CO₂e/MJ), 其中生物质 SAF 碳减排至少达到 5%, 而电制燃料 (以电解制氢为基础的 SAF 路径) 则需至少达到 70%。在土地与生态保护方面, RED 明确禁止使用来自原始森林、保护区等高碳储量或生物多样性敏感地区的原料, 并严格限制使用具有高 ILUC 风险的原料类型, 如棕榈油与大豆等, 尤其是那些与粮食用途存在潜在竞争的农产品。

与此同时, RED 还对电制 SAF 提出了额外要求, 规定其所用电力必须完全来自可再生能源, 且具备清晰的来源可追溯性, 满足时间相关性、空间相关性和新增性等。ⁱⁱ 此外, 法规还要求 SAF 生产商建立完整的原料及产品追溯体系, 以确保从原料采集、转化、运输到最终交付的各环节均符合可持续性和环境合规要求。该标准在全球范围内具有较高的参考价值, 已成为多个国家或地区制定本地 SAF 政策的重要参照。

- **《中国航空燃料可持续性评价规范 (征求意见稿) 》**

该标准是由中国民航局第二研究所、国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会联合制定, 是中国首个 SAF 可持续性方面的国家标准, 旨在推动国内 SAF 的可持续生产与使用。该标准共分为三个一级指标, 分别是环境可持续性、经济可持续性、社会可持续性, 在每个一级指标下面, 再设定若干个二级指标。

在环境可持续性方面, 根据要求, SAF 的全生命周期碳排放应相对于传统航空燃料减少至少 10%; 若原料来自种植作物, 还需额外计入由土地利用变化引起的温室气体排放, 以全面评估其碳足迹。此外, 原料不得来自原始森林、水体生态系统等高碳储量区域, 以保护生态系统的完整性和碳汇功能。除以上几个二级指标外, 该标准还对温室气体减排持久性、水、大气、土壤、废弃物等方面做出了相关规定。

ⁱⁱ “三个额外要求”主要包括:

额外性: 可再生电力设施应为新建设施, 即电力设施在制氢设施投产前 36 月内建成投产, 而在 2028 年前投产的项目暂时可以获得豁免, 豁免期到 2028 年 1 月 1 日止; 同时额外性还要求设施未接受任何补贴或投资优惠, 以免重复计算。

时间相关性: 制氢设施的电力消耗应与可再生电力设施的电力生产发生在同一个时间周期内。在 2030 年以前, 时间周期为自然月, 即电力消耗与生产发生在同一自然月内即为合规; 在 2030 年以后, 时间周期为小时, 即消耗与生产需发生在同一小时内。

地理相关性: 制氢设施与可再生电力设施之间的电力传输应不受实际电网连接限制, 方式有三: 同处同一电力竞价区内; 分别处在由电力通道连接的两个竞价区内, 且发电侧的现货市场电力价格应高于制氢侧, 以便减少通道阻塞; 若电力来自海上竞价区, 则要求两竞价区相连。

在社会可持续性方面，共有 4 个二级指标，分别是：劳动者权益、水资源利用、土地资源利用、粮食安全。其中较为特别的是“粮食安全”，该指标要求 SAF 应做到不与粮食作物争地、不与人争粮，应利用盐碱地、沙地等边缘土地资源，并且应以轮作、间作的方式种植原料。经济可持续性仅有一个二级指标，强调 SAF 项目应促进当地经济发展、增加税收、创造就业等。

除以上列举的指标外，该标准还对其他方面作出了一定要求，如要求生产企业建立完善的信息管理和质量控制体系，确保原料来源、生产过程和最终产品均可全流程追踪。该标准的出台不仅提升了国内 SAF 产业的规范程度，也为中国未来参与全球 SAF 标准体系的建设奠定了基础。

除了相关标准，可持续性的评价和测量方法也存在差异。目前国际较为主流的 SAF 可持续性评价体系有两套，分别由欧盟 RED 和 ICAO 制定。

为了统一评估方法、提升可操作性，欧盟 RED 为生物质燃料制定了可持续性评价体系。按规定，可持续性评价主要分为两个部分：温室气体排放（GHG）和土地利用变化（Land Use Change, LUC）。

- 温室气体排放覆盖产品的生命周期，从原材料的种植到最终的燃烧。
- 而土地利用变化条款则针对生物质燃料生产过程中对原有土地生态的破坏，以黑名单的形式规定了一些不得用于生物质燃料生产的土地类型。
- 此外，在 2023 年时，RED 又增加了对间接土地利用变化（ILUC）的约束。ILUC 指尽管生物质原料并非直接种植在被破坏的土地上，但因其挤占了原有粮食作物的生产，因而可能间接导致其他地区土地被粮食作物侵占的风险。RED 新增条款则限制了高间接土地利用变化风险的生物质燃料的应用。

与之类似，2023 年，ICAO 针对各个 SAF 技术路径发布了 SAF 生命周期评估（LCA）方法，明确界定了可持续性计算的边界与组成。该方法将 SAF 的总排放划分为“核心 LCA 排放”（Core LCA emissions）和“引发土地利用变化排放”（Induced Land Use Change, ILUC），均以 $89\text{ g CO}_2\text{e/MJ}$ 为单位衡量。

- 其中，核心 LCA 排放覆盖从原料种植、收获运输、燃料生产加工，到成品运输至加注点、以及最终在飞机上燃烧的全过程。由于流程链条长、涉及因素复杂，其变化范围较大。
- 而引发土地利用变化则指直接、间接土地利用变化而带来的温室气体排放增加量，其定义与欧盟定义基本类似。注意 ICAO 的 ILUC 指“引发土地利用变化 Induced Land Use Change”，其概念包括直接与间接两种。而欧盟语境下，ILUC 为 Indirect Land Use Change，仅指间接土地利用变化。^{22,23}
- ICAO 与欧盟的评价方法主要区别在于处理土地利用变化的方式上，欧盟以定性的方式，对高风险燃料单独进行限制；而 ICAO 则以定量的方式，将土地利用变化的影响换算为温室气体排放，与核心 LCA 一同参与计算。

三、生物质 SAF 的主要技术路线

3.1 技术简介、技术成熟度与发展现状

生物质 SAF 的原材料选择多样，包括脂肪和油类、糖类和谷物、城市固体废物、木材和农业残渣等。将这些原材料加工转化为 SAF 的技术需要获得美国材料与试验协会 (the American Society for Testing and Materials, ASTM International) 的批准后才能商业化使用。原料类型和工艺路径的选择会导致最终产物理化性质不同，因而影响 SAF 与传统化石航煤调和比例。为了保证调和后 SAF 与传统化石航煤的理化性质一致，纯 SAF 的调和比例一般在 0% 到 50% 之间。²⁴

ASTM 制定了两项与 SAF 相关的标准：ASTM D7566 和 ASTM D1655。其中，ASTM D7566 专门针对含合成碳氢化合物的航空涡轮燃料，覆盖了绝大多数的 SAF 生产技术路径；ASTM D1655 标准最初针对的是传统航空煤油，现已扩展至使用 SAF 原料或中间产品与传统航煤共炼的生产技术路径。²⁵

3.1.1 ASTM D7566 认证的 SAF 生产技术路径

截至 2025 年 6 月，ASTM D7566 24d 标准，已获得批准的 SAF 生产技术路径共有以下八种：²⁶

图表 5 ASTM D7566 批准的 SAF 生产技术

技术	介绍	原料	最大掺混比例%
费托合成链烷烃煤油 (FT-SPK)	利用生物质、固体废物等原料通过气化和费托合成制备的合成燃料	二氧化碳与可再生能源；城市固体废物；农 / 林业废弃物	50
加氢酯类和脂肪酸合成链烷烃煤油 (HEFA-SPK)	以植物油、废弃油脂等为原料，通过加氢处理生产的燃料	植物油与废油	50
合成异构烷烃 (SIP)	由经发酵的糖类物质生产的合成燃料	可发酵糖类	10
费托合成含芳烃煤油 (FT-SKA)	类似于GFT-SPK, 但包含一定比例的芳烃成分	二氧化碳与可再生能源；城市固体废物；农 / 林业废弃物	50
醇转化为喷气燃料合成链烷烃煤油 (AtJ-SPK)	由生物质发酵生成的醇类 (如异丁醇、乙醇) 转化而来的燃料。	乙醇与异丁醇	50
催化水热分解合成煤油 (CHJ)	通过催化水热分解技术，将生物质直接转化为燃料。	植物油与废油	50
烃类加氢酯类和脂肪酸合成石蜡煤油 (HC-HEFA SPK)	主要以藻类等为原料，通过加氢处理生产的燃料。	藻油	10
醇制含芳香烃石蜡煤油 (AtJ-SKA)	由生物质发酵生成的醇类 (如异丁醇、乙醇) 转化并芳构化而来的燃料。	生物质 C2-C5 醇类	50

3.1.2 ASTM D1655认证的SAF生产技术路径

ASTM D1655 标准主要针对传统航空煤油，在最新的版本 24b 中，认可了以下 3 种与 SAF 相关的共炼生产技术路径：²⁷

图表6 ASTM D1655批准的SAF生产路径

技术	介绍	原料	最大掺混比例%
费托合成产品在现有炼厂装置与化石基原料共炼	先通过费托合成工艺中，产出费托蜡与化石原料一起送入炼厂装置共炼，生产出含有生物成分的航空燃料。	二氧化碳与可再生能源；城市固体废物；农/林业废弃物	5
废弃油脂在传统炼厂与化石基原料在炼厂装置中共炼	在传统炼油过程中，将不超过5%的生物油脂（如植物油、动物脂肪）与化石原油共同加工，生产出符合航空燃料标准的混合燃料。	植物油与废油	5
传统炼厂初步加氢后原料与化石基原料在炼厂中共炼	在传统炼油过程中，将不超过24%的生物油脂（如植物油、动物脂肪）在初步加氢处理后与化石基原料共炼，生产出符合航空燃料标准的混合燃料。	初步加氢后的植物油与废油	10

需要注意的是，ASTM D1655 标准对最终产出 SAF 的掺混比例有相对严格限制（最高为 10%），而 ASTM D7566 标准则允许最终产出的 SAF 与传统航空燃料以更高比例（最高可达 50%）混合使用。通过主机厂和其它一些适航机构参与这些标准的制定和认证，ASTM 为 SAF 的生产和应用提供了明确的技术规范与标准。

总体来看，目前主流的生物质 SAF 技术路线主要可以分为三类：

1. HEFA

该技术路径主要通过加氢处理将废弃油脂类原料转化为 SAF，可使用的原料包括餐厨废油（UCO）、动物脂肪、利用边际土地种植的油料作物等。与 GFT 工艺相比，HEFA 路径工艺流程短、能耗较低，成本目前也显著低于其他技术路线，其可持续性由原料类型及土地利用变化的排放所决定。

2. GFT/MtJ

生物质气化 + 费托合成（GFT）是一种将生物质或废弃物通过气化、费托合成、加氢处理转化为航空燃料的工艺。GFT 技术的原料适应性较强，能够广泛利用农林业废弃物、城市固体废物等合规原料，因此在可持续性方面具有显著优势。

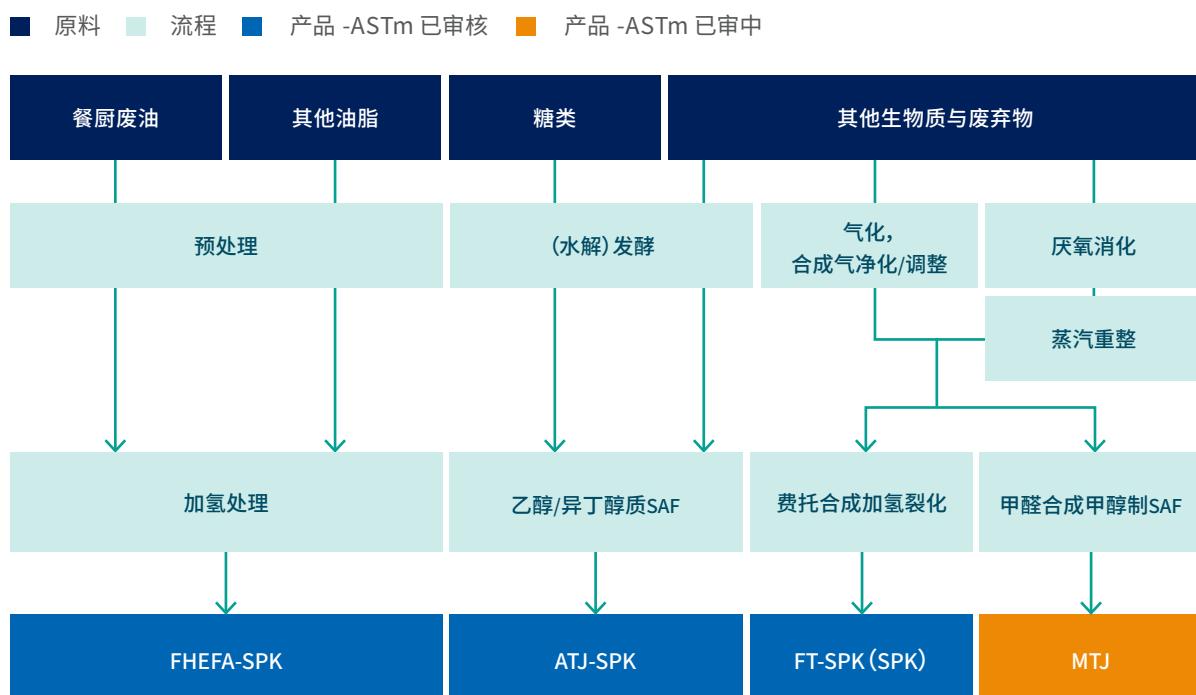
甲醇制 SAF（MtJ）在生产工艺上与 GFT 有一些相似之处，都需要首先将生物质材料气化生成合成气。但在合成阶段，MtJ 技术首先通过甲醇合成技术将合成气转化为甲醇，其后再进一步通过甲醇制烯烃、烯烃低聚、选择性加氢、产品分馏等步骤生产可持续航空燃料。除了烯烃路线外，托普索、埃克森美孚等企业也在探索甲醇制芳烃路线生产 SAF 的工艺技术路线。这些 MtJ 技术目前仍需按照 ASTMD4054 标准的要求完成相关审核步骤，才可以最终被纳入 ASTMD7566 标准。

3. AtJ

醇制 SAF 技术的主要原理是将乙醇、异丁醇或其它低碳醇类经脱水、烯烃低聚选择性加氢、产品分馏等步骤生成可持续航空燃料，结合不同国家及地区可持续认证标准的不同，可使用的原料可以是以纤维素、木质素为主的农林废弃物，也可以是玉米，甘蔗或能源作物。与 GFT 路线相比，AtJ 的工艺流程相对简单，操作条件更缓和，二者的技术成熟度相当。

HEFA 是目前全球最主流的 SAF 生产技术，已经实现大规模的商业化生产，占比超过 90%。²⁸ 然而，HEFA 受到废弃油脂等原料可供给数量的限制，长期来看 AtJ 和 GFT 技术在产能方面更具潜力。

图表 7 当前主流生物质 SAF 生产路线²⁹



制图: EASA

3.2 各技术路线可持续性分析

由于涉及到生物质原材料的生产和收集过程，不同生物质 SAF 产品的可持续性存在显著差异，不仅不同技术路线之间会存在区别，原料的来源也对最终产品的可持续性有较大影响。本段主要借鉴欧盟航空安全局的研究数据，以 ICAO 评价体系对不同燃料展开分析。^{30,31}

1. HEFA

HEFA-SAF 如果以废弃油脂为原料，则不涉及土地影响，仅需考虑核心 LCA 排放。例如，根据 ICAO 的估算，使用餐厨废油 (UCO) 生产的 SAF 全球平均排放值约为 13.9 g CO₂e/MJ。而若采用能源作物所产生的原生油脂作为原料，HEFA 路径的可持续性会因 ILUC 影响而大幅波动。例如，由马来西亚和印度尼西亚棕榈油制成的 SAF，其排放高达 99.1 g CO₂e/MJ，甚至超过了传统化石航空燃料。这是因为棕榈油种植常伴随热带雨林等原始生态系统的破坏，导致显著的碳释放。也正因如此，欧盟的 RefuelEU Aviation 中已经禁止使用棕榈油生产 SAF。相反，若选用在退化或干旱土地上种植的植物油，如印度的麻风树树籽油，不仅避免了 ILUC，还因其出色的碳封存能力，使其 ILUC 排放为负数，从而抵消了燃料生产与运输所产生的排放，最终 SAF 总排放值低至 -1.3 g CO₂e/MJ。

2. GFT/MtJ

MtJ 技术可持续性与 GFT 技术相似，此处也一并讨论。GFT 工艺的可持续性主要取决于原料来源及其对土地利用的影响。废弃物类原料（如木材废料、城市固体废物）因不涉及新增土地开发，其碳足迹主要集中于收集、运输和加工环节，整体温室气体排放水平较低。比如，全球尺度下，使用农业废弃物所生产的 SAF 排放仅为 7.7 g CO₂e/MJ。³²

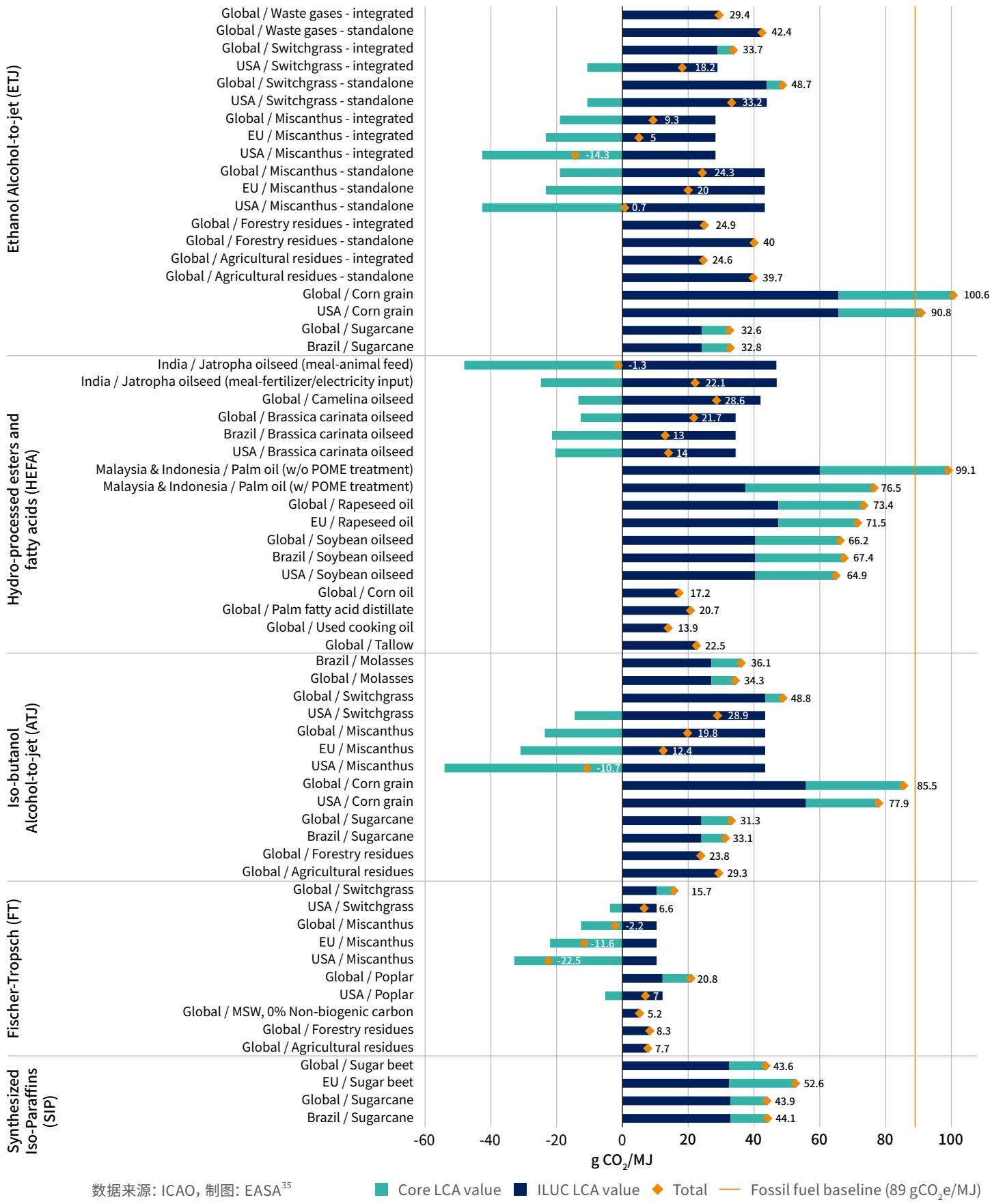
若使用能源作物为 GFT 路线的原料，则需考虑种植土地的资源竞争情况，评估后续引发的土地利用变化所带来的排放。以杨树为例，根据种植区域不同，杨树种植引发的 ILUC 既可以使得 SAF 排放升高至 20.8 g CO₂e/MJ，也可能发挥其碳封存效应抵消部分核心 LCA 排放，使总排放值低至约 7.0 g CO₂e/MJ。再如芦竹，可以大量种植于如盐碱地、废弃矿区等边际土地，如果种植在中国，则经过气化 GFT 工艺制成的 SAF 的排放值仅为 10.4 g CO₂e/MJ。³³

3. AtJ

与前述 GFT 和 HEFA 路径类似，乙醇或异丁醇制 SAF 路径的可持续性，同样受原料来源及其引发的土地利用变化影响。若采用农林业废弃物作为原料，由于不涉及新增土地开发，排放水平相对较低。例如，通过乙醇制 SAF 技术生产的 SAF，其排放通常在 24.6–40.0 g CO₂e/MJ 之间；若使用林业废弃物并采用异丁醇 SAF 技术，则 SAF 的排放值约为 23.8 g CO₂e/MJ。

然而，一旦涉及能源作物的种植，土地资源竞争便成为影响可持续性的关键因素。例如，若以玉米为原料，由于其在部分地区可能与粮食生产直接竞争，容易引发较高的 ILUC 排放，导致该路径下生产的 SAF 排放值最高可达 100.6 g CO₂e/MJ，已超过传统化石航煤的基准水平。相比之下，选择具备低 ILUC 风险和较强碳封存能力的能源作物，如芒草，则可以显著地提升 SAF 的可持续性。芒草可种植于荒地、盐碱地等退化土地，不仅几乎不产生土地竞争，还具备良好的土壤固碳效应。以美国为例，采用芒草并通过异丁醇转化工艺制备的 SAF，其总排放值可低至 -10.7 g CO₂e/MJ。再以种植在中国黄河地区边缘土地的芦竹为例，通过发酵成醇再制成 SAF 的排放值约为 28.3 g CO₂e/MJ。³⁴

图表 8 不同技术和原料所生产的 SAF 的排放值。



数据来源：ICAO, 制图：EASA³⁵

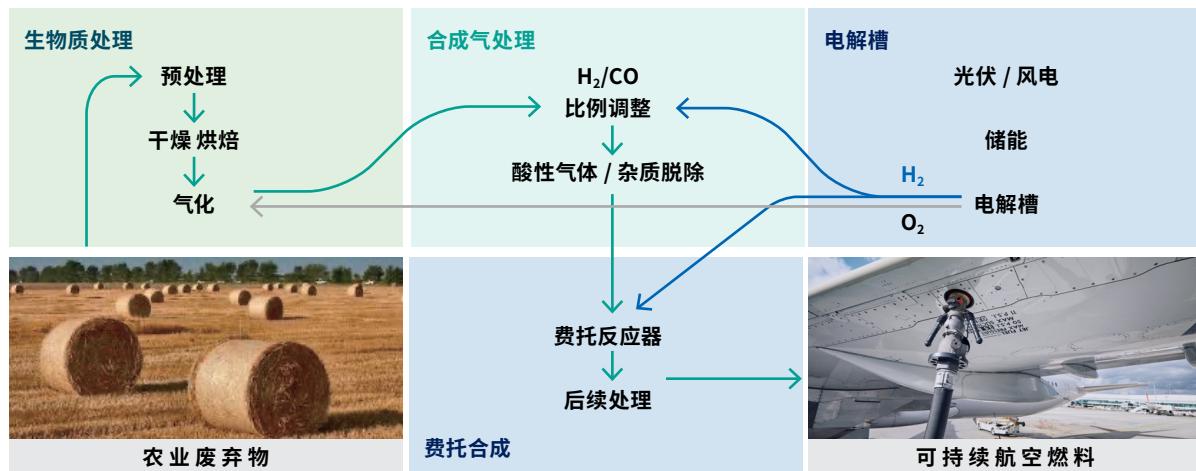
Core LCA value ■ ILUC LCA value ♦ Total — Fossil fuel baseline (89 gCO₂e/MJ)

3.3 生物质 SAF 和电制 SAF 的区别与联系

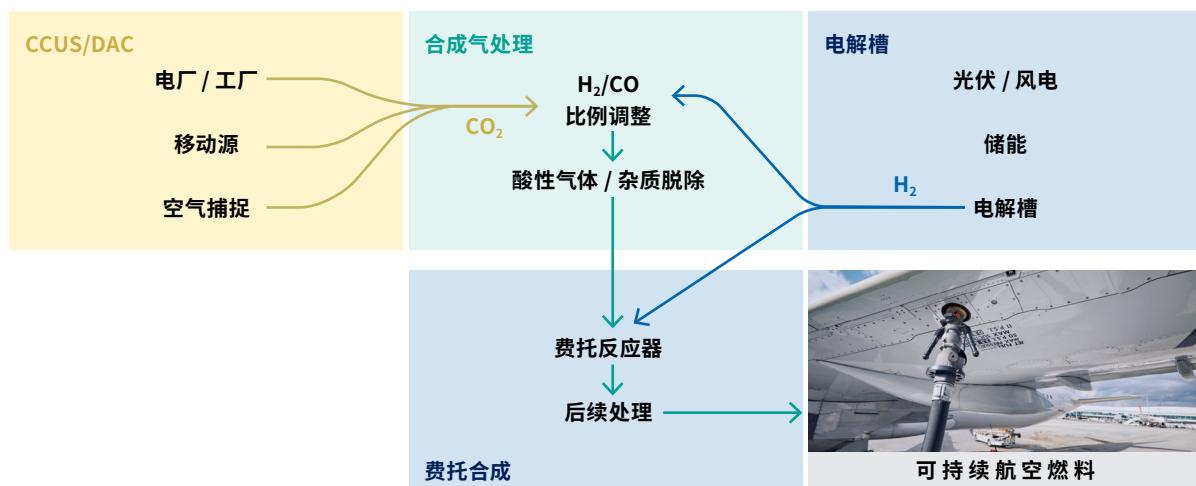
SAF 主要包括生物质 SAF (Bio-SAF) 和电制 SAF (e-SAF) 两大类。这两种技术路线在原料来源、生产路径、碳减排潜力、市场现状与未来发展等方面存在显著差异。Bio-SAF 以废弃油脂、废弃生物质等为原料，优点是技术成熟度相对较高，能够较快发展产能，但存在受制于土地资源、与粮食生产存在竞争关系等问题；而 e-SAF 则利用可再生电力将水电解为氢气，并与二氧化碳合成液体燃料，不依赖生物质资源，具备更强的可持续属性和长期扩展潜力。

两大类 SAF 技术并非完全互斥，在生产工艺上存在诸多共通环节。例如费托合成技术，主要原理是将合成气（一氧化碳和氢气的混合物）转化成碳链更长的碳氢化合物。若合成气来自生物质气化流程，则最终的 SAF 产物就属于生物质 SAF (生物质气化的合成气也可以与来自绿电电解水制氢所得绿氢耦合，再通过费托合成工艺生产 SAF，这样的过程可以定义为 PBtL (Power Biomass to Liquid 生物质耦合绿电制燃料)，为简便分类，本报告将其 PBtL 生产的 SAF 归为生物质 SAF)，而如果使用绿色电力电解水制备绿氢、使用碳捕集 (CCUS) 技术收集二氧化碳并将其转化为一氧化碳，那么此种来源的合成气经过费托合成、加氢裂化得到的可持续航空燃料就属于电制 SAF。两大类技术的原料虽来源不同，但生产工艺的某些步骤上却是高度相似的。

图表 9 费托合成用于生物质SAF的生产



图表 10 费托合成用于电制SAF的生产



在 2025 至 2035 年间，以 HEFA 为主的生物质 SAF 将继续占据市场主导地位，主要原因是这些工艺相对成熟，且成本经济性较好。电制 SAF 由于 PtL 技术成本仍然偏高和基础设施建设发展水平不均等因素，无法在短期内在全球范围实现大规模商业化生产。因此，在这一时间尺度，生物质 SAF 仍将是全球 SAF 的主要来源。而 2035 至 2050 年之间，随着可再生电力成本的逐步下降，电制 SAF 有望克服目前的技术和成本障碍，成为未来主要的 SAF 生产技术之一。

图表 11 生物质SAF与电制SAF的原料来源

	生物质 SAF	电制 SAF
主要原料	动植物油脂、农业废弃物、林业残余物、城市固体废弃物、生物甲醇 / 乙醇等	二氧化碳(CO_2) (从空气中捕集、工业排放碳源、生物质碳源) + 绿氢(H_2) (通过可再生能源电解水制备)
碳源	有机生物质(固有碳循环)	空气捕集或工业排放的 CO_2 (可实现碳封存)
可持续性影响	受限于生物质供应量、土地使用变化(ILUC)、食物竞争	有机会实现 100% 零碳，但对电力供应的可持续性要求非常严格，否则会产生更高的碳排放

图表 12 生物质SAF与电制SAF的生产工艺

	生物质 SAF	电制 SAF
主要生产工艺	① HEFA (加氢酯类和脂肪酸) ② Gasification-FT (气化 - 费托合成) ③ AtJ-SPK (醇转喷气燃料) ④ MtJ (甲醇合成制喷气燃料，尚未纳入 ASTM)	① CO_2 与绿氢转化为合成气后再进行费托合成 ② CO_2 与绿氢转化为甲醇再制喷气燃料 (Methanol-to-Jet, MtJ) ③ 直接从 CO_2 合成航空燃料 (CO_2 AF) ④ CO_2 与绿氢转化为低碳烯烃后制备 SAF 工艺
生产难度	除 HEFA 已实行商业化生产，AtJ 和 GFT 正处于研发向工业化过渡的阶段	仍处于示范阶段，核心瓶颈在于 CO_2 捕集与绿氢制备成本

图表 13 生物质SAF与电制SAF的减排能力

	生物质 SAF	电制 SAF
生命周期碳减排	平均 80% (具体取决于原料和供应链) 具备负碳强度的潜力 (参见图表 8)	最高 100% (使用 DAC+ 可再生能源可实现零碳)
关键影响因素	原料可持续性 (是否避免食物竞争)、原料收集能耗、生产过程能耗、运输过程能耗	绿氢和可再生电力的供给能力和成本经济性、运输过程能耗

图表 14 生物质SAF与电制SAF的经济性³⁶

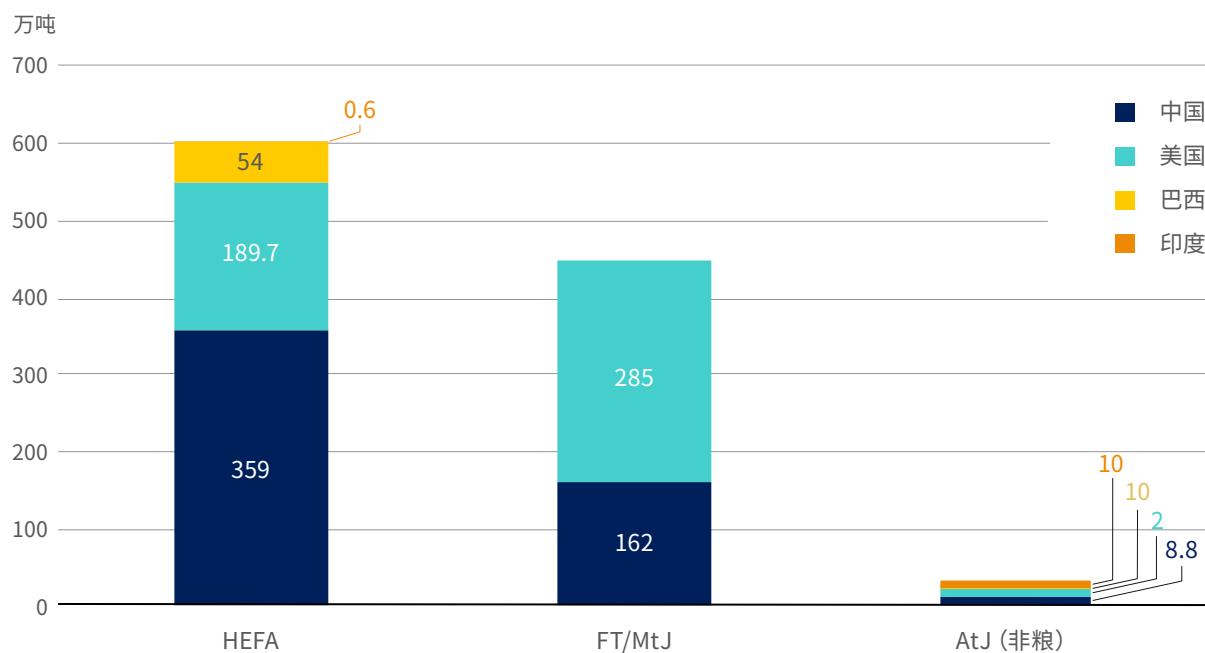
	生物质 SAF	电制 SAF
当前成本	1350–1800 美元 / 吨 (是化石燃料的 2–3 倍)	2600–9500 美元 / 吨 (约为化石燃料的 4–15 倍，而鉴于中国在可再生能源产业的生产优势，成本更有望贴近该区间的下限，欧美等地区受限于产业成本等因素，则更接近该区间的上限)
技术成熟度	商业化生产已启动，HEFA 路线最成熟	仍处于研发与示范阶段，2030 年前难以大规模应用
市场规模	>99% 的 SAF 产量来自生物质	电制 SAF 仅占全球 SAF 市场的 1% 以下

四、中国及全球主要国家生物质SAF供给预测

4.1 全球主要国家生物质 SAF 产量潜力预测

生物质 SAF 的产能潜力主要受生物质原料的供给情况影响，因此，本篇报告选取了中国、美国、巴西与印度四个生物质原料大国作为研究对象，从生物质资源（原材料）和产业链布局情况（产能）两方面评估了各国的生物质 SAF 生产能力（图表 15）。

图表 15 不考虑粮食原料的前提下，2030年生物质SAF产量潜力上限



4.1.1 中国

1. 中国生物质资源简介

中国是世界领先的农业生产国和工业大国，拥有庞大的人口和多样化的农林生态系统。主要农作物包括水稻、小麦、玉米、大豆、薯类、油菜籽等，同时畜牧业（特别是猪和家禽）和水产养殖业规模巨大。广泛的农林业活动、工业生产和密集的城市生活产生了大量的生物质废弃物和副产品，这些资源如果得到有效收集和利用，将为中国的 SAF 产业提供极其丰富的原料基础。中国的主要生物质资源情况如下：

图表 16 中国生物质资源整体情况



图表 17 中国可用作SAF生产的生物质资源量



- 动物脂肪：中国是全球最大的猪肉和禽肉生产国，畜牧业规模庞大。在肉类加工过程中会产生大量的动物脂肪，如猪油、牛油、禽油。据落基山研究所（RMI）统计，每年可产生 210 万吨的废弃动物脂肪。³⁷ 然而，动物脂肪在食品、化工、饲料以及现有生物柴油生产中已有广泛应用。目前废弃油脂收集率约 20%，³⁸ 如果进行有效收集和调配，预计 2030 年约 30% 的废弃动物脂肪，即 63 万吨，可用于 HEFA 途径生产 SAF。
- 餐厨废油：中国拥有超过 14 亿人口，餐饮业发达，植物油消费量巨大，由此产生巨量的餐厨废油。据估算，中国 2023 年食用油消费预计产生废弃油脂约 1100 万吨，其中部分难以被有效收集和利用。预计中国 UCO 年可收集量约 810 万吨。未来受 UCO 生产生物柴油的需求进一步降低，欧盟对中国生物柴油反倾销的持续以及中国大量 SAF 项目的陆续投产等因素影响，预计 2030 年可用作 SAF 生产原料的资源量约为 450 万吨。³⁹

- 农业废弃物：作为农业大国，中国耕地面积高达 19.29 亿亩，⁴⁰ 每年产生巨量的农作物秸秆（包括水稻、小麦、玉米、棉花秸秆等），据估计年产量约为 8.5 亿吨。⁴¹ 目前，秸秆的主要处理方式包括还田、饲料、基料、以及部分地区的露天焚烧（已被严格限制但仍存在）或简单的能源化利用（如直燃发电、成型燃料）。由于分布广泛、收集成本高、季节性强以及存在其他竞争性用途，可有效用于大规模先进生物燃料生产的潜力尚需充分挖掘。据 RMI 估计，未来约 20% 的农业废弃物具备能源化利用的潜力，约为 1.7 亿吨。在中国，其主要转化路径为生物质气化后生产 SAF (GFT/MtJ)，少部分也可水解发酵生产纤维素乙醇进而生产 SAF (AtJ)。
- 林业废弃物：中国拥有广阔的森林面积，高达 2.8 亿公顷，包括天然林和大规模的人工林（如桉树、杨树等）。⁴² 在木材采伐、加工过程中会产生大量的枝桠、树皮、锯末等废弃物，年产生总量估计可达 3.35 亿吨。⁴³ 初步估算，未来有收集利用潜力的林业废弃物大约占 15%，约为 5030 万吨。与农业秸秆类似，收集、运输和预处理是其规模化利用的主要挑战。这部分资源同样适用于 GFT 和 AtJ 技术路线。

能源作物 能源作物指主要为生产能源而非粮食目的而专门种植的作物，典型代表包括芦竹、柳枝稷、芒草、杨树、桉树等特定速生品种。以芦竹为例，其适应性强，可以在不适宜粮食生产的灌木林地、疏散林地、部分草地、盐碱地以及废弃耕地等边际土地进行种植，从而避免与粮食生产争地、保障生态安全。每亩地芦竹的干基生物产量可达 3-8 吨 / 年，一次种植可连续收割十余年。截至 2023 年底，中国芦竹已在 13 个省 24 个地区进行种植，总种植面积近 10 万亩。⁴⁴ 根据清华大学等机构的研究，通过对我国边际土地资源的系统评估，并结合适宜种植的能源作物品种及其产量潜力进行测算，预测在严格遵守粮食安全、林地与草地保护、生物多样性保护等政策约束的前提下，到 2030 年，中国能源作物的年生产潜力可达到 7.36 亿吨。⁴⁵ 但考虑到现实因素限制，到 2030 年，预计届时仅能实现潜力的 1%，即约 736 万吨能源作物可用于生产 SAF。

城市固体废弃物 (MSW)：快速的城镇化进程使得中国面临巨大的城市固体废弃物处理压力，年产生量超过 2 亿吨。⁴⁶ 其中的有机物组分（厨余垃圾、绿化垃圾等）可以通过厌氧消化产生沼气，或通过气化等技术转化为合成气，用于生产燃料。不过，MSW 成分复杂、含水量高、分类收集体系尚不完善是其资源化利用的主要障碍。一般来说，固体废弃物需要进一步处理成相对均质的垃圾衍生燃料（Refuse-Derived Fuel, RDF）后方可作为生产 SAF 的原料，估计从 MSW 到 RDF 的转化率约为 40%。总体来看，考虑到 MSW 的可收集利用量和转化为 RDF 过程中的损耗，预计 2030 年可用于生产 SAF 的垃圾衍生燃料约为 5,080 万吨。不过，虽然 MSW 理论可利用量十分丰富，但实际操作中，由于 MSW 的种类十分多样、复杂，这对需要稳定单一原料供应的工业生产而言实际操作难度较大，大多数情况下 MSW 并不是大规模项目的理想原料。

2. 中国生物质燃料产业链

- HEFA 产业链：

中国的 HEFA 产业链正依托其丰富的 UCO 资源快速构建。UCO 的高效收集与满足加氢要求的高标准预处理是该产业链的关键环节和价值所在，国内已初步形成专业化的预处理能力，为后续生产奠定了原料基础。例如，山高环能、朗坤环境等行业领先企业已具备大规模 UCO 回收能力，为下游 HEFA 途径生产 SAF 提供了可靠保障。^{47, 48}

近年来，受全球 SAF 需求增长及国内政策信号驱动，中国 HEFA 产能建设进入快速发展期。据不完全统计，截至 2025 年 4 月，已公开的规划及在建产能合计接近 600 万吨 / 年。参与主体呈现多元化格局。中国石化镇海炼化分公司投产了国内首套生物质 SAF 工业装置，并持续进行技术优化和产能提升规划；易高怡斯莱一期 30 万吨 / 年 HVO/SAF 产能于 2022 年实现投产；河南君恒一期 20 万吨 / 年产能于 2023 年年底投产；嘉澳环保产能 37 万吨 / 年产能于 2024 年年底投产⁴⁹；山东海科化工集团的 37 万吨 / 年产能也已投产，明确以 UCO 等废弃油脂为主要原料，并整合了国际先进技术（如阿法拉伐的预处理工艺和阿克森斯 Axens 的 Vegan® 加氢工艺）。⁵⁰ 四川天舟、四川金尚环保等公司亦有相关产能布局。另一方面，拥有废弃油脂处置许可、具备稳定原料渠道和运营经验的生物柴油生产企业，正积极向技术附加值更高的 SAF 领域拓展。例如，卓越新能源投资建设了年产 10 万吨的 HVO/SAF 项目，寻求在产业链升级中占据有利位置⁵¹；鹏鹞环保对现有加氢装置

进行技改，已成功利用 UCO 生产出 SAF 产品。⁵²

- **AtJ 产业链：**

AtJ 路径通过将生物基醇类（主要是乙醇）转化为航空燃料，为生物质 SAF 提供了另一条重要技术路线。中国是全球第五大燃料乙醇生产国，约占全球总产量的 4.0%，2024 年年产量约为 1041 万吨，具备一定的乙醇产业基础。⁵³ 但其产能结构严重依赖玉米、小麦等粮食基乙醇，占总规划产能的 70%。政策虽鼓励发展木薯、甜高粱等非粮作物乙醇（规划产能占比 20%）以及基于农林废弃物的纤维素乙醇（规划产能占比 10%），但目前适用于生产生物质 SAF 的非粮乙醇、特别是纤维素乙醇的实际供应能力，相比整体乙醇产业规模仍然十分有限，构成了 AtJ 路线在中国发展的主要瓶颈。

尽管中国农林废弃物理论资源量巨大，但目前国内纤维素乙醇产业仍处于早期阶段，年产能仅约 15 万吨左右，主要参与者包括河南天冠集团、山东龙力生物、安徽国祯集团等，且多数项目仍处于示范或早期商业化探索，未能形成规模经济。

制约纤维素乙醇大规模发展的主要挑战体现在技术经济性和原料保障两个核心层面。一方面，将木质纤维素高效、经济地转化为可发酵糖的技术难度远超第一代粮食乙醇，涉及高昂的预处理环节投资以及仍居高不下的高效纤维素酶等关键成本，导致其最终产品缺乏市场竞争力。另一方面，农林废弃物作为原料普遍具有分布广、体积大、能量密度低及季节性强等固有特点，这使得构建高效、低成本的收储体系极为困难，原料的稳定供应和质量均一性也难以保证，这些因素都显著增加了规模化生产的难度和整体成本。

尽管下游的 AtJ 转化技术本身相对成熟，但缺乏大规模、经济可行的纤维素乙醇供应，使得基于丰富农林废弃物资源的 AtJ-SAF 路线在中国的近期商业化潜力受到显著制约。其未来的发展高度依赖于纤维素乙醇生产技术的重大突破和成本的大幅下降。可喜的是在纤维素乙醇生产 SAF 领域，已有中国企业准备开展积极探索。日前，安徽丰原已与霍尼韦尔签订战略合作协议，基于秸秆乙醇的产业基础，将在蚌埠建设可持续航空煤油项目。⁵⁴ 另外还有宁夏嘉泽在黑龙江鸡西市投资的绿氢醇航油化工联产项目，该项目已于 2025 年 4 月开工。⁵⁵

除了上述完全利用生物基原料通过 ATJ 技术路线生产 SAF 的情境，中国正在着力打造由工业尾气 - 乙醇 - SAF 的产业链。早在 2018 年中国就已成功实现了工业尾气制乙醇技术的工业化，截至 2025 年已形成了 21 万吨 / 年的工业尾气制乙醇产能。目前，已有工业尾气制乙醇企业启动了相关的醇制 SAF (ATJ) 项目并计划于 2026 年投入运营。未来，若工业尾气制 SAF 的产业链打通，辅以中国丰富的工业尾气资源，必将会极大的推动中国 SAF 的供给能力，助力民航业脱碳进程。

- **GFT/MtJ 产业链：**

目前中国已规划的利用生物质气化制 SAF 产能主要分为 GFT 和 MtJ 两条路线，两种技术有一定的相似性，因此此处一同讨论。

发展基于生物质的 GFT 路径，可有效利用其在全球领先的煤间接液化 (CTL) 产业所奠定的基础。目前，中国已投运的煤间接液化总产能超过 772 万吨，在全球范围内占据重要地位。CTL 与 GFT 制航煤技术的核心环节高度共通，两者均依赖费托合成将合成气转化为液体燃料，只是前端合成气的来源不同——CTL 使用煤炭，而 GFT 利用生物质。因此，中国在 CTL 领域积累的成熟费托合成技术、大规模工程化能力和运营经验，构成了发展 GFT 的技术和产业基础。

MtJ 路线的优势在于其产品选择更加灵活。MtJ 技术首先会利用生物质合成气生成甲醇，甲醇本身既可以作为航运脱碳常用的绿色燃料对外销售，也可以继续加工生产 SAF 和其他燃料。因此对于生产企业来说，MtJ 技术生产的产品种类更丰富，对市场波动的承受能力也更强。尽管 MtJ 技术目前尚未被纳入 ASTM，但相关积累也已经较为成熟，国际上已经有可供授权许可的成熟技术方案。⁵⁶

GFT 和 MtJ 两种技术并没有明显的优劣之分，厂商一般根据自身情况（产能、产品类型、周边配套产业等）自由选择，甚至可能同时布局两种技术路线。目前，中国在生物质 GFT/MtJ 的路线上已经规划了一定产能。中能建在黑龙江双鸭山的年产 10 万吨 GFT 项目已于 2024 年底开始建设，其后中能建还计划在新疆、吉林、内蒙古、辽宁等多个省市建设一批生物质气化与风光耦合制甲醇与 SAF 的生产设施。此外，岚泽能源、内蒙古久泰、国家能源集团等也在布局相关产能。⁵⁷ 根据网络公开资料统计，采用生物质气化 +GFT 或甲醇制 SAF 的产能规划总量已经超过 160 万吨，但多数项目或是尚未开工，或是仅将 SAF 产能列为远期规划、早期主要生产绿色甲醇，目前实际一期明确投产 SAF 的项目总产能仅 10 万吨。

与 AtJ 类似，目前阻碍中国发展 GFT/MtJ 的挑战主要集中在前端的原料收集和气化环节。作为主要原料的农林废弃物通常分布分散、不易运输。不仅如此，与相对均质的煤炭不同，生物质（如农林废弃物、城市固体废弃物）成分复杂、水分和灰分含量多变，将其高效气化需解决进料稳定性、焦油脱除、合成气净化等一系列技术难点。因此，如何构建高效、低成本的原材料收集体系，从源头上保证原料的均一性和稳定性，是未来产业发展的主要难题。

图表 18 中国已规划bio-GFT/PBtL项目清单

厂商	项目位置	近期 SAF 产能 (万吨)	远期 SAF 产能 (万吨)	项目进展
中国能建	新疆乌鲁木齐		20	项目总体规划建设年产 20 万吨绿色航空煤油、年产 160 万吨生物质颗粒装置。尚无开工信息。
中国能建	黑龙江双鸭山	10		2024 年 10 月 14 日开工建设，一期规划年产 20 万吨绿色甲醇及 10 万吨绿色航油。
中国能建	吉林白城		30	绿色氢氨醇一体化项目，年产 30 万吨绿色航油、30 万吨绿色甲醇。2023 年 11 月签约，2024 年 10 月开工，一期仅建设甲醇产能。
中国能建	吉林吉林		10	绿色甲醇和绿色航煤一体化项目，规划年产 20 万吨绿色甲醇和 10 万吨绿色航煤项目。尚无开工信息。
中国能建	内蒙古通辽		10	项目计划建设 60 万吨绿色甲醇和 10 万吨绿色航煤。尚无开工信息。
中国能建	新疆克拉玛依		10	建设年产 10 万吨绿色航煤、年产 1 万吨绿氢以及 1GW 风光新能源项目。2024 年 6 月 27 日签约，尚无开工信息。
中国能建	辽宁沈阳康平县		40	生物质搭配风电制甲醇、航煤项目。一期投资建设 10 万吨绿色甲醇项目，二期拟投资建设 40 万吨绿色航油项目。
中国能建	新疆昌吉呼图壁县		10	新能源耦合生物质制绿色航煤。2024 年 8 月 8 日签约，尚无开工信息。
国家能源集团	河南濮阳		6	计划 2026 年 6 月开工，2028 年 6 月完工。计划每年消耗 60 万吨秸秆，配 100 兆瓦风电。
国家能源集团	吉林双辽		16	“风光绿色氢醇制航空煤油”一体化项目，计划 2025 年 12 月开工，2027 年 10 月竣工。
加总		10	152	

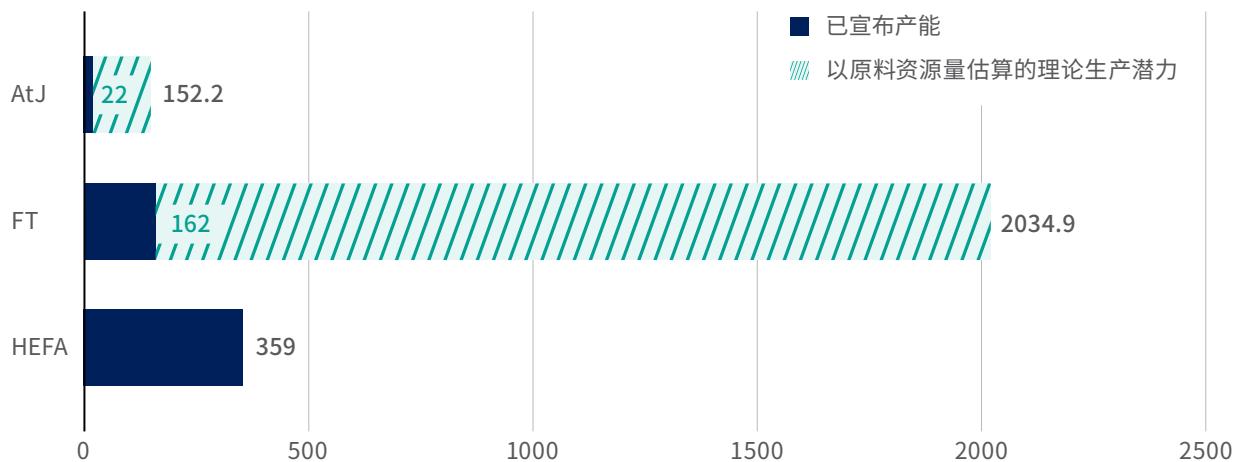
3. 中国生物质 SAF 生产能力预测

根据对中国生物质资源可获得性及现有规划的生物质处理能力的综合评估，预计到 2030 年中国 SAF 的年供给能力上限约 543 万吨。其中，HEFA 路线预计将贡献绝大部分产能，约 359 万吨 / 年；AtJ 路线尚处发展初期，预计供给能力上限约 22 万吨 / 年；生物质气化 +GFT/MtJ 路线原材料理论上非常充足，根据已规划产能规模预测供给能力上限可以达到 162 万吨。

凭借相对成熟的技术和对废弃油脂类原料的适用性，HEFA 技术将成为中国近期 SAF 供应的绝对主力。其主要原料为国内产生的废弃油脂，包括 UCO 和动物脂肪，其中 UCO 是关键来源。考虑到实际的收集效率、物流网络和预处理能力等现实因素，据测算，这两类原料的总可利用量约为每年 513 万吨。按照典型的 HEFA 工艺转化率，若这些原料全部用于生产 SAF，其最大年产量约为 359 万吨。值得注意的是，目前中国已宣布或规划中的 HEFA 项目产能合计已超过 600 万吨 / 年，这预示着未来市场可能竞争激烈、相关企业应尽早布局，抢占先机。可持续、稳定且具有成本竞争力的废弃油脂供应将是决定 HEFA 实际产量的关键。

GFT/MtJ 和 AtJ 路线在中国目前均处于商业化的起步或示范阶段，不过，这两条路线具备更广泛的原料潜力，特别是中国储量丰富的农业废弃物、林业废弃物以及潜在的能源作物。此外，GFT/MtJ 路线还具备处理 MSW 的灵活性。根据 RMI 估算，考虑到生物质原料的竞争性、含水量等因素，预计未来 GFT/MtJ 路线理论上产能高达约 2435 万吨。不过，虽然中国大规模、低成本的生物质收集、运输和预处理体系已经初步建立，但尚有一定的完善空间，且相关技术仍需突破和规模化验证。因此 2030 年中国对生物质资源的利用能力仍然值得讨论。

图表 19 2030年中国生物质SAF供给上限 (万吨)



4.1.2 美国

1. 美国生物质资源简介

在美国寻求能源转型与航空业可持续发展的背景下，国内丰富的生物质资源成为生产 SAF 等生物燃料的关键要素。其资源库涵盖了已具备相对成熟收集体系的 UCO 和动物脂肪，工业副产品妥尔油，以及体量巨大的农业废弃物、林业废弃物和城市固体废弃物，同时也在探索能源作物的潜力。尽管资源种类多样、总量可观，但用于 SAF 生产的可行性与经济性因资源类型、现有政策下的市场分配、收集成本及技术成熟度等因素而异。接下来将详细探讨美国各类主要生物质资源的具体情况。

图表 20 美国生物质资源整体情况

	动物脂肪 590 万吨		餐厨废油 210 万吨
	农业废弃物 1.6 亿吨		林业废弃物 2050 万吨
	潜在能源作物产物 2 亿吨		城市固废 4340 万吨

图表 21 美国可以用作 SAF 生产的生物质资源量

	动物脂肪 120 万吨		餐厨废油 105 万吨
	农业废弃物 2790 万吨		林业废弃物 369 万吨
	潜在能源作物产物 398 万吨		城市固废 1736 万吨
	妥尔油 46 万吨		

- **动物脂肪：**美国是全球主要牛肉生产国之一。庞大的畜牧业每年产生大量的动物脂肪，包括牛油和猪油等。根据 RMI 统计，每年的动物脂肪产量可达 590 万吨。但考虑到可收集比例，预计 2030 年约有 120 万吨动物脂肪可以被收集作为 SAF 生产的原材料。
- **餐厨废油：**美国人口超过 3.3 亿，且在联邦和州政府的政策支持下，UCO 收集制度相对健全和成熟。根据公开资料和 RMI 测算，美国每年可收集 210–250 万吨 UCO。^{58, 59} 不过，美国 UCO 主要用作生物质基柴油（Biomass-Based Diesel，即“生物柴油”，包括 FAME 和 HVO）生产，且成本相比中国更高，能够用作 SAF 生产的比例有限。

由于美国政策（包括联邦 RFS 和州级别政策）强制要求一定比例的生物质原料柴油掺混，需求十分稳定，因此生物质柴油生产商对 UCO 原料成本相对不敏感，并不需要从国外进口廉价原料。⁶⁰ 而在 SAF 市场中，买卖双方相对自由，美国政府仅通过 40B 提供部分补贴，生产商面临盈利压力，因此需要更廉价的原料来压低成本，在本地 UCO 无法满足需求时，生产商不得不转而进口。在 SAF 相关政策出台之前，美国一直是 UCO 净出口国，而随着 SAF 行业发展美国逐渐变为了全球最大的 UCO 进口国之一，从中可见美国 SAF 产业对进口 UCO 原料的依赖。

未来，随着《法案》的实施，美国的 SAF 生产将禁止使用非美国、加拿大、墨西哥的原料，导致 UCO 进口通道阻塞，而本地 UCO 被用于生产生物柴油和 SAF 的具体分配比例难以精确预测，这取决于两者在政策激励下的实时市场经济性。因此，考虑到和生物柴油对于 UCO 原料的竞争，本研究假设 UCO 将被平均分配，即 105 万吨用于 SAF 生产。

- **妥尔油：**妥尔油是造纸过程中产生的副产品，从纸浆生产过程中回收分离而来。根据 USDA 统计，全球妥尔油年产量估计约为 200 万吨，主要产地集中在北美、北欧、俄罗斯。⁶¹ 美国妥尔油年产量约为 46 万吨。对于妥尔油这种工业副产品来说，其产量就是从纸浆生产过程中实际回收和分离出来的量。这个过程本身就是收集和提取。因此，预计 2030 年可用作原料的妥尔油即 46 万吨。
- **农业废弃物：**美国是全球主要的玉米生产国，每年产生大量的玉米秸秆、玉米芯以及其他农作物秸秆，如大豆秸秆、小麦秸秆等。这些农业残余物数量庞大，且具有较高的纤维素含量，是生产生物燃料的理想原料。美国中西部作为主要的农业产区，在农业残余物利用方面具有显著的优势。根据忧思科学家联盟 (Union of Concerned Scientists) 的数据，预计 2030 年农业废弃物产量为 1.55 亿吨，综合考虑美国现有农废的其它用途，本报告测算其中可用作 SAF 原料的量约为 2790 万吨。⁶²
- **林业废弃物：**美国拥有广阔的森林资源。木材加工业每年产生大量的林业废弃物，如树枝、树皮、木屑等。特别是在美国北部和西北部等林业发达地区，林业废弃物的潜力尤为突出。忧思科学家联盟基于美国能源部橡树岭国家实验室 (ORNL) 的数据和建模，以严格的可持续性标准评估了 2030 年生物质产量，其中林业废弃物是 2050 万吨。⁶³ 预计长远来看（2030 年后）可用作 SAF 原料的量为 369 万吨。
- **能源作物：**美国也在积极发展能源作物的种植，例如柳枝稷、芒草等。根据忧思科学家联盟，能源作物是最大的潜在生物质来源，预计 2030 年理想情况下产能上限为 3.98 亿吨。⁶⁴ 如果仅考虑在边际土地或废弃土地上种植的能源作物，同样以 1% 的比例估计，预计 2030 年可收集量仅为 398 万吨。
- **城市固体废弃物 (MSW)：**与能源作物和农业残留物等来源相比，废弃物在整体生物质潜力中所占的比例相对较小。根据忧思科学家联盟的数据，预计 2030 年城市固体废弃物产量为 4340 万吨。⁶⁵ 固体废弃物需要进一步处理成相对均质的垃圾衍生燃料 (Refuse-Derived Fuel, RDF) 后方可作为生产 SAF 的原料，预计 2030 年将有 1736 万吨的垃圾衍生燃料可供使用。

2. 美国生物质燃料产业链

- HEFA 产业链：

在各类技术路线中, HEFA 工艺因其技术成熟度及对多种废弃油脂原料的兼容性而备受关注, 这些原料包括动物脂肪、妥尔油以及餐厨废油。尤为关键的是, 美国现有的大量可再生柴油生产设施具备联产 SAF 或直接转换为 SAF 生产的能力, 这为 HEFA SAF 的快速发展奠定了坚实基础。

美国在 UCO 等 HEFA 原料的收集与处理方面已形成相当规模的产业基础, 并呈现出垂直整合趋势。2022 年时, 本土 UCO 收集量已经达到 8.5 亿加仑 (约 250 万吨)。以 Darling Ingredients 为例, 作为动物副产品和食品废弃物处理领域的领军企业, 该公司不仅建立了广泛的 UCO 收集网络, 还通过其与 Valero Energy 合资成立的 Diamond Green Diesel (DGD), 将回收的原料直接投入可再生燃料生产, 实现了显著的从原料到产品的垂直整合。此外, 下游生产商向上游整合以保障原料供应安全的趋势日益明显。例如, 全球可再生燃料巨头 Neste 收购了专注于 UCO 和油脂收集的 Mahoney Environmental, 此举直接强化了 Neste 在美国本土生产设施的原料稳定供应。

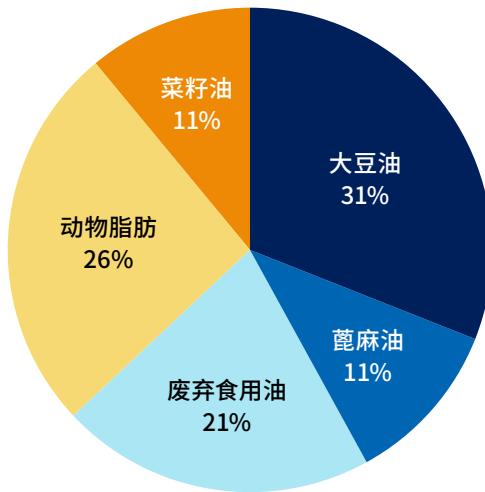
不过, 尽管美国内已建立起较为成熟的 UCO 回收体系, 但本土收集成本较高。近年来, 随着生物柴油 (美国语境下指 Biodiesel, 即 FAME, 成本和工艺难度较低) 和可再生柴油 (指 Renewable Diesel, 即 HVO, 成本和工艺难度较高, 但同时性能也更好) 产能的迅速扩张以及 SAF 需求的初步显现, 美国对 UCO 等低碳原料的需求急剧增长, 这一缺口使得美国日益依赖从国际市场, 需要大量进口 UCO (尤其是从亚洲) 来满足生产需求。不过, 由于主要 UCO 出口国在收紧 UCO 贸易, 且《大而美法案》已将原材料合规地区限制在美、加、墨三国, 未来美国将需要重新依赖北美 UCO 供应。

本土产能方面, 美国已成为全球 HEFA-SAF 投资的热点地区, 目前虽然大多数工厂以生产生物柴油为主, 但相当一部分已具备或正在积极拓展 SAF 的联产能力。根据 RMI 基于公开信息的分析预测, 到 2030 年, 美国通过 HEFA 路径生产的 SAF 年规划产能有望达到约 660 万吨 / 年, 显示出巨大的增长潜力。ⁱⁱⁱ 前文提到的 Diamond Green Diesel (DGD) 已将其位于得克萨斯州亚瑟港 (Port Arthur) 的工厂进行升级, 改造后约 50% 的产能 (约 2.35 亿加仑 / 年) 将用于生产 SAF。⁶⁶ 值得注意的是, 加利福尼亚州凭借其积极的低碳燃料政策 (如 LCFS - 低碳燃料标准) 和激励措施, 已成为美国商业化 SAF 项目的主要聚集地。众多关键项目选择落户加州, 其中包括: Neste 与 Marathon Petroleum 的合资项目 Martinez Renewables; Phillips 66 雄心勃勃的炼厂转型项目 Rodeo Renewed; 以及 World Energy 位于派拉蒙 (Paramount) 的工厂。这些企业均采用或计划采用 HEFA 工艺处理 UCO 和牛脂等原料以生产航空燃料。

除了 UCO 和牛脂等废弃油脂原料, 美国在生产生物质燃料 (包括生物柴油和 SAF) 时实际上还应用了大量的油类作物原料, 包括大豆油、蓖麻油、菜籽油等。根据 ICAO 的测算 (见图表 22), 这部分原料虽然同样属于生物质原料, 但由于存在较高的间接土地利用变化碳排放, 导致其减排效果十分有限。在 2025 年的《大而美法案》中, 政策对于原材料的间接土地利用变化碳排放的要求进一步放开, 即便使用粮食作物生产 SAF 也可以满足美国 50kg CO₂/mmBTU 的碳排放标准要求。在这一政策引导下, 可能会有更多的非废弃油脂类原料进入 SAF 市场。不过, 鉴于中、欧等其他主要航空市场对原材料的限制, 以及主要 SAF 买家对高可持续性产品的偏好, 此类 SAF 很难在国际市场流通。

ⁱⁱⁱ 但需要强调的是, 此处的 660 万吨是根据目前已宣布的 HEFA-SAF 项目所统计出来的, 随着美国对 UCO 等生物原料设立进口壁垒, 实际产量可能远低于该数值。

图表 22 美国生物质燃料主要原料构成（按重量计）



数据来源: Argus

总体而言，美国基于 UCO 的 HEFA SAF 产业链已初步形成较为完善的基础，体现在成熟的原料回收网络、大规模生产设施的投资建设以及如 DGD 所展示的成功垂直整合案例。然而，新法案给进口原料增加了贸易壁垒、进一步放开了农作物原材料的限制，加之美国 UCO 等原料的本地供应有限且成本较高、其他行业（如化工、食品）对原料的竞争加剧，美国未来短时间内有可能向农作物为原料的 HEFA 生产转型，这将成为真正低碳可持续的 HEFA SAF 长期发展的核心瓶颈。

- AtJ 产业链：

美国是全球最大的燃料乙醇生产国，年产量高达约 160 亿加仑，但这其中绝大部分是基于玉米的第一代乙醇。⁶⁷ 虽然现有的玉米乙醇基础设施规模庞大，可为 AtJ 提供潜在的原料来源，但其可持续性备受争议。尤其是在欧盟和 ICAO 等国际框架下，玉米乙醇通常不被视为满足 SAF 可持续性标准的合格原料，这限制了其直接用于生产符合国际规范的 SAF。

理想的 AtJ 原料是来自非粮生物质的第二代乙醇，即纤维素乙醇。然而，美国在纤维素乙醇商业化方面遭遇了显著挫折。杜邦（DuPont）、Poet-DSM 和 Abengoa 等公司曾在 2010 年代中期投入巨资建设商业规模的纤维素乙醇工厂，但由于高昂的生产成本、复杂且难以规模化的原料收集储运体系等问题，这些先驱项目目前均已停止纤维素乙醇的生产——其中一座被封存，另两座则被出售并转型用于生产沼气等其他产品。这直接导致美国本土当前缺乏大规模商业化运营的纤维素乙醇产能，成为制约 AtJ 路径采用低碳、可持续原料的关键瓶颈。

尽管面临可持续原料供应的挑战，基于乙醇的 AtJ 技术商业化进程已取得一定进展。基于厂商公开宣布的信息汇总，到 2030 年时美国规划 AtJ 产能将达到 235 万吨。LanzaJet 公司是这一领域的领军者，其位于佐治亚州的 Freedom Pines Fuels 工厂是全球首个商业化乙醇制 SAF 设施，已于 2024 年 1 月正式投产，标志着乙醇基 AtJ 路线商业化的重要里程碑。该工厂设计年产能为 1000 万加仑 AtJ-SAF（约 3 万吨），包括 900 万加仑 SAF 和 100 万加仑可再生柴油。⁶⁸ 其投产初期的原料主要依赖于当地采购的传统玉米乙醇，但战略目标是逐步过渡到更多元化、碳强度更低的乙醇来源。这包括未来可能使用的第二代纤维素乙醇（来自农业废弃物、林业废弃物或能源作物），以及通过其母公司 LanzaTech 的气体发酵技术，利用工业废气（如钢厂尾气）转化生成的乙醇。除乙醇外，其他醇类也可作为 AtJ 原料。Gevo 公司将自产的异丁醇转化为 SAF，并已实现了小批量的商业交付，代表了另一条已在美国实现运营的 AtJ 技术路径。这展示了 AtJ 路径在利用不同醇类平台方面的潜力。

总的来说，美国的 AtJ 产业链正处于从示范迈向早期商业化的关键阶段，以 LanzaJet 的乙醇路线和 Gevo 的异丁醇路线为代表。然而，该路径的长期、大规模发展，特别是要满足国际可持续性标准，其核心挑战仍在于如何成功开发并规模化具有成本效益的、可持续的非粮乙醇（或其他醇类）原料供应体系。

- **GFT 产业链：**

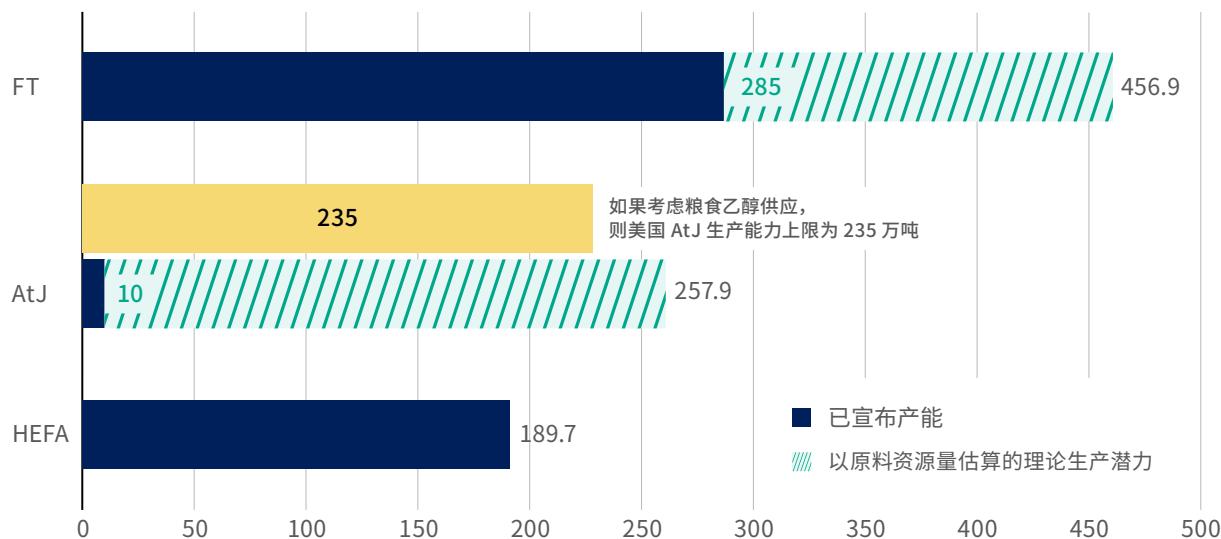
在美国，GFT 是生产 SAF 的一条关键技术路径，其优势在于能够转化多样化的含碳原料。与中国可依托成熟的煤制油（CTL）产业基础不同，美国缺乏现成的大规模 GFT 工业设施，因此 GFT-SAF 的发展主要依赖于新建项目。当前，美国探索的 GFT 路线主要包括：利用林业或农业废弃物的生物质制 SAF（BTL）、利用 MSW 的垃圾制 SAF（WTL）。尽管 GFT 技术通过气化环节能处理多种原料，绕开了生物化学转化的某些瓶颈，但在美国将其商业化仍面临严峻挑战，特别是前端非均质原料的高效且经济的气化技术。

目前，美国已涌现出多个规划中的以生物质为原料的 GFT-SAF 项目，总规划产能约 234 万吨。例如，Strategic Biofuels 公司位于路易斯安那州的 Project Evergreen 项目，计划利用林业废弃物通过 BTL-GFT 路线年产约 3200 万加仑（约 10 万吨）以 SAF 为主的燃料，是当前进展相对靠前的大型规划项目之一。⁶⁹ 然而，该行业的发展并非一帆风顺，Fulcrum BioEnergy 的案例提供了重要的前车之鉴，其位于内华达州的旗舰工厂是全球首个商业规模的垃圾制 SAF（WTL）工厂，但在投产后不久便遭遇了严重的运营、许可和财务问题，最终于 2024 年倒闭，充分暴露了该技术路线商业化过程中的巨大执行风险和经济性挑战。总体而言，尽管美国规划了相当规模的 GFT 产能，但如何将这些规划转化为可靠、经济的大规模商业运营，克服技术、工程和融资上的多重障碍，仍是美国 GFT 产业链面临的核心挑战。

3. 美国生物质 SAF 生产能力预测

综合评估美国丰富的生物质资源可获得性、技术路径的成熟度与挑战、以及现有和规划中的生物质处理能力，预计到 2030 年，美国 SAF 年供给能力上限有望达到约 558.2 万吨。其中，技术相对成熟的 HEFA 路径预计将贡献约 263.2 万吨，其增长主要受限于可持续废弃油脂的实际供应量以及对进口原料的依赖程度。潜力最大但同时也伴随较高执行风险的是 GFT 路径，预计可贡献约 285 万吨。这一预测能否实现，关键在于规划中的多个大型生物质及废弃物转化项目能否成功克服技术、工程和融资方面的重大挑战，将规划产能转化为可靠的商业运营。相比之下，AtJ 路径的贡献预计将较为有限，上限约为 10 万吨，其规模化发展当前面临最主要的瓶颈在于缺乏大规模、具备成本效益的商业化纤维素乙醇或其他可持续非粮醇类原料供应。但是如果将粮食乙醇也纳入可选原料的范围，那么 AtJ 路径预计可以贡献 235 万吨 SAF。因此，美国能否在 2030 年达到预期的 SAF 供给水平，将高度依赖于 HEFA 原料瓶颈的缓解程度、高风险 GFT 项目能否顺利投产并稳定运行。

图表 23 2030 年美国生物质 SAF 供给上限 (万吨)



4.1.3 巴西

1. 巴西生物质资源简介

巴西是重要的农林产业大国，主要作物包括大豆、玉米、甘蔗、桉树等，同时拥有规模庞大的畜牧业。巴西也是生物质资源最丰富的国家之一，农林产业产生了大量的副产品和剩余残渣，充分利用后能够为巴西 SAF 产业提供丰富的原材料资源。

不过，巴西作为生物燃料大国，已经对废弃油脂、乙醇原料等资源进行了充分的开发和应用，SAF 的生产将面临来自其他生物燃料产业的竞争，因此 SAF 的可用资源量一定程度上要由产业政策决定。为了促进航空业减排，巴西在 2024 年推出了“国家航空生物质燃料计划”ProBioQAV，计划要求所有航空公司通过应用 SAF 来减少巴西本土航线的碳排放，减排比例将从 2027 年的 1% 起逐渐增加到 2037 年的 10%。根据 EPE 估计，这一计划将在 2030 年带来约 35.6 万吨的 SAF 需求。

巴西的主要资源情况如下：

图表 24 巴西生物质资源整体情况

 <p>动物脂肪 151 万吨</p>	 <p>餐厨废油 108 万吨</p>
 <p>农业废弃物 7000 万吨</p>	 <p>林业废弃物 5200 万吨</p>
 <p>甘蔗废弃物 2.6 亿吨</p>	 <p>城市固废 8180 万吨</p>

图表 25 巴西可用作SAF生产的生物质资源量（以2030年时为准）

 <p>动物脂肪 35 万吨</p>	 <p>餐厨废油 16 万吨</p>
 <p>农业废弃物 700 万吨</p>	 <p>林业废弃物 2080 万吨</p>
 <p>甘蔗废弃物 2600 万吨</p>	 <p>城市固废 3040 万吨</p>

- 动物脂肪：除了农业，巴西的畜牧业规模同样可观，是全球第二大的牛肉生产国（仅次于美国）和最大的牛肉出口国，年产量超过 1000 万吨，同时，巴西每年也生产超过 400 万吨的猪肉。肉类加工产生的脂肪可以用来生产可持续燃料，根据联合国粮农组织 2022 年数据，巴西每年生产牛脂近百万吨，猪脂约 54 万吨。不过，由于动物脂肪本身用途较为广泛，大量用于生物柴油生产，仅此一项每年就消耗动物脂肪超过 63 万吨。因此据巴西矿业与能源局下属的能源研究所 Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 估计，如果合理收集，仅有约 20% 的动物脂肪能够被用作航空生物燃料生产。⁷⁰ 不过，如果未来 HEFA-SAF 的市场需求快速提升，原本用于生物柴油的部分原料可能会被转而用于航空燃料生产，根据 ProBioQAV 的要求，2030 年时巴西最多需要 35.6 万吨，刨除其他技术路线的供给，最多需要废弃油脂类原料 51 万吨，其中动物脂肪将贡献 35 万吨。
- 餐厨废油：巴西全国人口 2.1 亿，每年消费超过 300 万吨植物油用于烹饪，日常饮食产生大量 UCO。根据 RMI 估算，巴西全年可产生 UCO 近 108 万吨，理论上可回收量可观，但目前回收率较低，仅约 3.5% 至

10%。2020 年巴西仅有约 4.9 万吨 UCO 被回收用于可持续燃料生产，其余则由于缺乏有效的收集系统和政策支持而被不当处理，导致环境污染。⁷¹ 近年来，一些企业和地方政府开始采取措施促进 UCO 回收和再利用。本研究预计到 2030 年时，UCO 回收率可以达到 15%，则对应资源量为 16 万吨。

- 林业废弃物：巴西拥有广阔的天然林资源，同时也人工大量种植了经济木材，其中最主要的桉树种植面积达到了 750 万公顷。在桉树加工过程中会产生树枝、树皮等林业废弃物，据估计，这部分材料的总产量高达每年 4100 万吨，其中 40% 有潜在的利用空间，对应资源量为 2080 万吨。^{72, 73} 林业废弃物的后续生产途径较为多样，既可以高温气化后用作 GFT 生产 SAF，也可以通过水解发酵生产乙醇，用乙醇制航空燃料 (AtJ)，由于巴西本身乙醇工业较为发达，后者的可行性更大。
- 甘蔗残余物：甘蔗是巴西最重要的经济作物，每年产量超过 7 亿吨，占全球总产量的约 40%，主要用作糖和乙醇的生产。生产同时，甘蔗会产生大量的甘蔗秸秆和甘蔗渣，每年产量大约在 2.6 亿吨左右。由于这些资源是甘蔗生产的副产物，因此十分便于收集利用。大部分副产物会被甘蔗工厂直接用作燃料或其他材料，仅有约 10% 的甘蔗渣和秸秆有可能被利用，对应资源量为 2600 万吨。⁷⁴ 这部分残余纤维素可以通过水解发酵制得乙醇，并进一步通过 AtJ 技术制成 SAF。
- 其他：除了上述主要资源外，巴西还有部分其他资源可用作 SAF 生产，包括其他农业废弃物、工业废气和城市固废等。这部分资源尽管总量相对较小，但在行业发展初期依然有可能带来额外的燃料产能。

2. 巴西生物质燃料产业链

基于规模庞大的农林产业，巴西拥有完备的生物燃料产业链以及悠久的生产历史，主要依赖甘蔗、玉米和大豆等农业作物。2023 年巴西共生产 353 亿升乙醇（约 2785 万吨）和 75 亿升生物柴油（约 623 万吨），⁷⁵ 是全球第二大乙醇生产国和第三大生物柴油生产国。2016 年时，巴西政府推出了 RenovaBio 计划，通过设定碳强度减排目标、生物燃料认证和设置碳信用体系等政策手段推动生物燃料的使用和推广。

巴西目前的生物燃料产业完全基于农业作物，大豆、玉米、甘蔗等原材料在巴西政策框架下均属于可以推广的低碳生物质资源，巴西政府认为以此生产的燃料可以实现比传统燃料更低的碳排放。但在目前全球主流的政策框架下，基于土地利用变化 (ILUC) 的考虑，农业作物生产的低碳燃料一般不被认可，因此本篇报告不对此类燃料进行进一步讨论。

尽管如此，发达的传统生物燃料产业为未来可持续燃料的生产提供了产业基础和技术支持。只需要打通上游的关键环节，现有的生产设备就能够转而生产可持续燃料。根据现有产能规划，未来巴西在生物质航空燃料领域将主要依靠 HEFA 和 AtJ 两条技术路线：

- HEFA 产业链：巴西是美国、印尼之后的第三大生物柴油单一国家市场，其现有的生物柴油原料 69% 来自大豆油，牛脂和其他动物脂肪占比 22%，餐厨废油占比约 2%。巴西目前拥有超过 60 家生物柴油生产企业，产能超过 148 亿升 / 年（约合 1180 万吨 / 年），产能非常巨大。⁷⁶

不过，巴西主流的生物柴油产品属于脂肪酸甲酯 (FAME)，其生产技术无法满足氢化油脂 (HVO) 等较为先进产品的条件，因此到 88 万吨，意味着届时巴西废弃油脂类资源的处理能力将远大于其可持续原料（不包括豆油等作物）资源量。

- AtJ 产业链：巴西是乙醇生产大国，但其生产原料中的玉米、甘蔗等糖类作物无法满足国际主流的 SAF 可持续性标准。若要使用甘蔗渣、林业废物等可持续原料生产乙醇，进而转化为 SAF，则要考虑到该技术需要更复杂的水解发酵工艺，与糖制乙醇工艺有较大不同，不仅流程更复杂，成本也更高。目前巴西仅有隶属于壳牌的 Raizen 一家企业使用纤维素 / 木质素生产乙醇，年产量约 5100 万升（约 4 万吨）。未来 Raizen 计划继续扩大规模，到 2030 年时预计产能将达到将近 16 亿升乙醇（约 126 万吨）。⁷⁷

然而，尽管目前已经有部分企业开展乙醇生产 SAF 相关的技术研发，巴西仍然没有明确的利用乙醇生产 SAF 的产能规划，导致虽然巴西具备一定的纤维素乙醇生产潜力，通过该技术路径将乙醇进一步转化为 SAF 的能力仍然相对有限。根据公开信息估算，乐观情况下 2030 年巴西通过纤维素乙醇生产 SAF 的 AtJ 产能约为 2 万吨 / 年。不过长期来看，AtJ 技术本身相对成熟，一旦上下游产业链逐步打通成熟，未来 AtJ-SAF 生产规模将快速增加。

3. 巴西生物质 SAF 生产能力预测

由于巴西生物柴油产业对原材料的竞争，预计 SAF 产业产能不会大幅超出 ProBioQAV 的要求值，因此 2030 年时，全国预计 SAF 总需求约为 35 万吨。其中约 33 万吨将来自于 HEFA 路线，剩余 2 万吨左右将来自 AtJ 路线。

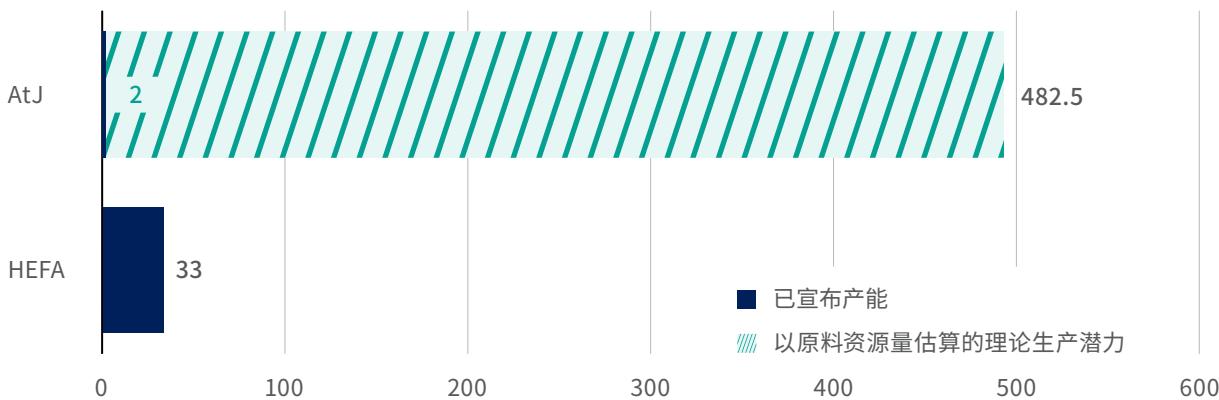
HEFA-SAF 将是巴西未来一段时间内的主流。巴西的废弃油脂主要有两个来源：UCO 以及动物脂肪。由于人口总量和饮食习惯方面的因素，巴西的 UCO 资源并不如中美等人口大国丰富，在传统的生物柴油加工产业中 UCO 的原材料占比也不过 2%。相比之下，巴西的动物养殖产业提供了丰富的动物脂肪资源，将成为 HEFA-SAF 的最主要原材料。考虑到收集能力等因素，两种原料最多可以为可持续原料产业提供 109 万吨原材料，但是考虑到巴西政府设定了 2030 年掺混 20% 生物柴油的政策目标，对 SAF 的可用资源量产生了一定挤压，因此预计 2030 年，按照 ProBioQAV 的要求，用于 SAF 生产的油脂资源总量约为 51 万吨，对应巴西 HEFA-SAF 的生产能力为 33 万吨。

AtJ 的技术成熟度相对较低，生产成本偏高，因此短时间内很难取代 HEFA 的主导地位。但巴西的农林废弃物资源十分丰富，未来有潜力成为最主流的原材料类型。巴西的甘蔗产业每年产生约 2.6 亿吨的各类甘蔗废弃物，不仅产量惊人，作为甘蔗处理的副产品也有利于收集和利用。再加上桉树废料、其他农业废弃物等，巴西能够用作可持续燃料生产的纤维素 / 木质素类原料总量将达到 5380 万吨，充分考虑到原料的可收集利用量和含水量等因素后，预计潜在 SAF 生产总量 482.5 万吨。不过由于纤维素 / 木质素制 SAF 的生产流程较长，SAF 产量同时受到纤维素乙醇产量（到 2030 年预计约 40 万吨 / 年）和 AtJ 生产企业产能（2030 年时约有 2 万吨 / 年）的限制。因此预计到 2030 年时，巴西 AtJ-SAF 产能上限也仅为 2 万吨。

而考虑到巴西的生物质资源在技术适配性等方面更适合用于发展 AtJ 路线，在尚未存在规划部署的情况下，GFT 技术在巴西的产业化发展基础较为薄弱。同时，由于中等规模经济体通常会重点选择具备优势特点的技术路线布局和发展，GFT 技术在短期内得到快速发展的机会相对有限，基于成本效益与资源优化配置原则，预计至 2030 年，GFT 技术在巴西实现大规模应用的可能性较低。

综合来看，借助成熟的生物质燃料产业链，巴西未来有潜力成为生物质 SAF 的主要生产国之一。短期内巴西将主要生产 HEFA-SAF，而长期来看 AtJ-SAF 将逐步成为主流。GFT 技术由于在巴西没有产业基础，且生产成本偏高，基本不可能在巴西大范围应用。

图表 26 2030年巴西生物质SAF供给上限（万吨）



4.1.4 印度

1. 印度生物质资源简介

印度是全球农业大国，不仅是水稻、小麦、棉花和甘蔗等农作物的主要生产国，同时还拥有发达的畜牧业，生物质资源极为丰富。与此同时，作为人口大国，印度的城市固体废弃物和餐厨废油等废弃物生物质总量也颇为可观。但是，由于回收体系尚不健全、生物质资源利用产业发展不足，大量生物质资源未被有效开发利用。印度的主要生物质资源情况如下：

图表 27 印度生物质资源整体情况



图表 28 印度可用作SAF生产的生物质资源量



- 动物脂肪：印度拥有全球最大的牛群，约 3 亿头，⁷⁸ 理论潜力约为 1800 万吨。^{iv} 但是，由于牛在印度教中被视为神圣，多数牛主要用于奶制品生产或耕作，而非屠宰。即使在极少数可以宰杀的地区，该行业也要受到严格的限制，使得用于提炼牛脂的原料数量极为有限。据统计，2023 年印度牛脂出口量仅约 12 万吨，⁷⁹ 远低于其理论潜力。考虑到文化宗教等因素，除 SAF 外，该类资源在印度国内应暂无其他竞争性用途。预计到 2030 年，该资源量仍将保持该水平，维持在 12 万吨左右。
- 餐厨废油：印度人口约 14.4 亿，仅食用领域每年便消耗 2200 至 2700 万吨植物油，⁸⁰ UCO 的理论可收集量约为 320 万吨，然而受限于不成熟的回收体系，2023 年实际回收利用量仅为 12.5 万吨。⁸¹ 为了减少对化石燃料的依赖并提升生物质资源的能源化水平，印度政府于 2018 年启动了生物柴油计划，设定了到 2030 年在道路交通燃料中实现 5% 混合的目标。同年，印度食品安全与标准管理局推出了“餐厨废油再利用倡议”（Repurpose Used Cooking Oil Initiative），旨在提升废弃油脂的收集率，防止 UCO 重新流入餐饮系统，并推动生物柴油生产。尽管相关政策已实施多年，但截至 2023 年，UCO 的实际利用仍远未达到潜在资源量，回收体系亟需完善。综合考虑到政策助力等因素，预计 2030 年回收利用率可达 30%，则对应餐厨废油的资源实际可收集量为 96 万吨。
- 蔗渣（Bagasse）：近十年来，印度一直是全球最大的甘蔗生产国之一。为消化甘蔗产量并减少对进口石油的依赖，印度政府于 2003 年启动了“乙醇掺混计划”（Ethanol Blending with Petrol Program, EBP），在 9 个州实行在汽油中掺混 5% 乙醇的政策。2018 年，印度进一步出台了“国家生物燃料政策”（2018 National Biofuel Policy），提出到 2025 年将汽油中乙醇掺混比例提升至 20% 的目标。该系列政策显著推动了印度乙醇产业的发展，根据印度石油与天然气部的统计数据，EBP 项目下的乙醇供应量已从 2014 年约 30 万吨大幅增长至 2024 年的 558 万吨。⁸² 据 USDA 估算，2024 年，印度乙醇产量约为 501.7 万吨，同时产生副产品——蔗渣约 1.3 亿吨。⁸³ 考虑到蔗渣的回收利用率，及与其他利用途径的原料竞争性等因素，预计仅有 10% 的蔗渣可用于 SAF 的生产，则对应蔗渣的资源量为 1300 万吨。
- 农业废弃物：印度是全球主要的粮食生产国，水稻、小麦和玉米等大宗作物种植规模庞大，每年产生大量稻壳、秸秆等农业废弃物。根据印度可再生能源部所统计的生物质资源情况，印度每年约产生 2.3 亿吨的农业废弃物，⁸⁴ 其中约 52.7% 被直接焚烧或弃置，⁸⁵ 既造成了严重的空气污染，也浪费了宝贵的生物质资源。尽管政府在努力通过乙醇掺混等政策，来积极推动利用农业废弃物生产乙醇，但成效仍然有限，2024 年农业废弃物仅占乙醇生产原料的 12.2% 左右。^{v, 86} 如果综合考虑整体回收利用率、与乙醇生产的原材料竞争性等影响因素，以 50% 回收利用率、其中有 10% 用于 SAF 生产的比例估算，则印度每年可用于 SAF 生产的农业废弃物资源量为 1150 万吨。
- 其他：考虑到人口等因素，印度有其他多种生物质资源可待利用。比如城市固废，印度每年产生超过 6200 万吨，仅有 4300 万吨被收集处理，可开发潜力较大。⁸⁷ 固体废弃物需要进一步处理成相对均质的垃圾衍生燃料（Refuse-Derived Fuel, RDF）后方可作为生产 SAF 的原料，预计 2030 年将有 1720 万吨的垃圾衍生燃料可供使用。

2. 印度生物质燃料产业链

印度农业资源丰富，是全球生物质燃料（如乙醇）的重要生产国。2024 年，印度以约 501.7 万吨的产量，位列全球第三大乙醇生产国，仅次于巴西和美国。从原料方面来看，87.7% 的乙醇原料来自甘蔗衍生品，对单一能源作物高度依赖。而秸秆、稻壳等农业废弃物的能源化利用仍处于初级阶段，蕴藏着巨大的开发潜力。

为推动生物质资源的开发和利用，印度政府发布了多项生物质燃料政策。早在 2003 年，印度就启动了“乙醇掺

iv 按照 600kg/ 头牛、10% 可回收油脂、10% 年出栏率来估算

v 此处的农业废弃物主要指受损的粮食，大部分仍通过糖类发酵路径生产乙醇，而非 2G 纤维素乙醇

混计划”（EBP），鼓励以乙醇替代部分汽油使用。2018年6月印度政府又颁布了《国家生物燃料政策》，明确了将支持发展以农林废弃物、非食用油、城市固废等为原料的先进生物燃料，旨在减少对化石能源的依赖，并推动可再生能源发展。在SAF领域，印度也加快了相关政策布局。2023年，印度国家生物燃料协调委员会（NBCC）曾经设定过分阶段的掺混目标：到2025年，国内航班的SAF掺混率达到1%，到2030年提升至5%，但截至目前为止其2025年的国内航班掺混目标并未执行。另外，印度石油和天然气部对国际航班也设定过目标：2027年掺混率达1%，并于2028年提高至2%。虽然印度政府设定了SAF掺混目标，但是受限于产能和技术，该项政策目前尚未开始执行，预计会推迟至2027年。⁸⁸

- HEFA产业链：虽然HEFA是当前全球SAF主流生产工艺，但在印度的发展严重受到原料供应的制约。2023年，印度可用于能源化的UCO仅为12.5万吨，大部分已流向生物柴油市场，而政府又计划至2030年在道路交通燃料中实现5%的生物柴油掺混目标，进一步压缩了可用于SAF的UCO资源量，使HEFA在短期内难以实现产能扩张。

当前仅有印度工程有限公司（EIL）在卡纳塔克邦芒格洛尔的规划项目，该项目预计在2026年底投产，设计能力为每日2万升，年产约5600吨，主要原料包括UCO和棕榈硬脂。⁸⁹

- 印度生物质AtJ产业链：印度在AtJ路线更具扩张潜力。印度政府在2018年《国家生物燃料政策》中提出，到2030年要将5-10亿升（约40-80万吨）的纤维素乙醇掺入汽油，并已拨款2.2亿美元支持12个示范项目建设。纤维素乙醇是AtJ-SAF的重要原料，若上述项目按计划投产，将显著提高AtJ的推广可行性。

目前有印度石油公司（IOCL）与美国LanzaJet合作，在哈里亚纳邦帕尼帕特炼油厂建设AtJ-SAF生产装置。项目总投资约1.22亿美元，预计年产1.1亿升（约88000吨）SAF。尽管当前的AtJ规划产能仅有8.8万吨，但在政府掺混目标、纤维素乙醇扩能计划以及国际减排压力的共同驱动下，未来这一数字有望迅速攀升，使AtJ成为印度SAF规模化发展的主导技术路径。⁹⁰

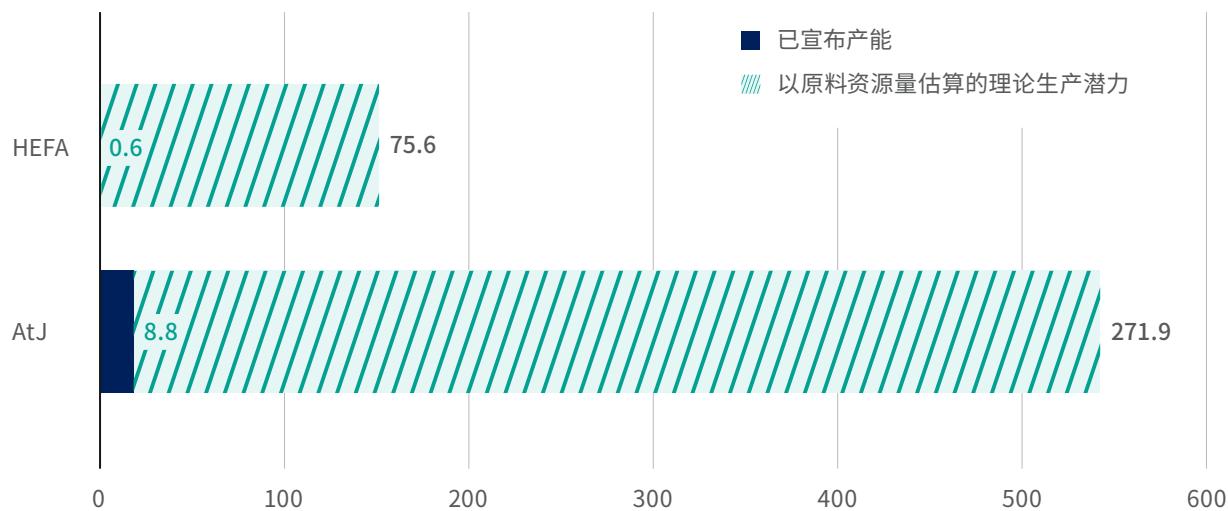
- 印度生物质GFT产业链：印度在SAF发展中不太可能大规模采用GFT技术路线，主要原因有二：首先，印度在GFT技术方面积累有限，传统上费托技术主要应用于煤制油领域，而印度直到2022年才由国家政府提出到2030年建成100万吨煤制油产能的目标，整体进展较慢，不仅如此，在生物质气化技术方面印度同样面临瓶颈；其次，相较之下，印度在AtJ路线所依赖的乙醇产业已有较为深厚的产业基础，因此更倾向于采用该技术路径。目前印度已规划的SAF产能中，超过90%为AtJ路线，显示出其对该路线的明显偏好。

3. SAF生产能力预测

印度拥有丰富的农业资源与良好的产业基础，为实现SAF的规模化生产提供了坚实支撑。基于当前的资源收集能力和规划产能，到2030年印度的SAF年供给能力上限约为9.4万吨，其中约8.8万吨可通过AtJ路径实现，其余小部分依赖HEFA路线。如果从原料的角度评估，印度具备大幅提升产能的空间——仅以乙醇副产物蔗渣为例，在2030年收集利用率达到10%的情况下，该路线理论上可产出约188.5万吨SAF；而若将原料进一步拓展至农业废弃物，即使农业废弃物的收集率仅为50%，且其中只有10%能够用于SAF的生产，也能够增加约83.4万吨SAF的年产能力，使印度AtJ路线的SAF总生产潜力达到每年约271.9万吨。

尽管如此，当前印度SAF规划产能与2030年掺混目标仍然存在显著差距。印度政府计划2030年实现航空燃料中SAF掺混比例达5%，以2023年865万吨化石航煤消费量为基数，⁹¹按年均6.9%的需求增长率测算，2030年航油需求量将增至约1379.9万吨，对应SAF需求约69万吨。而现有SAF产能不到10万吨，远无法满足市场需求。不过，随着上游原料供应链优化完善，以及AtJ等核心生产技术的产能持续扩张，印度SAF供给能力有望快速提升，逐步缩小与2030年目标的差距。

图表 29 2030 年印度生物质 SAF 供给上限 (万吨)



4.2 全球主要国家生物质 SAF 成本构成分析

为便于比较不同国家及技术路径下的 SAF 生产成本，除非另有说明，本研究对三种技术路线的 CAPEX 估算分别采用如下产能规模：HEFA-20 万吨 / 年、AtJ-5 万吨 / 年、GFT-10 万吨 / 年。另外，为最大程度优化成本结构，并体现当前深度炼化技术的发展，模型采用相对较高的产品收率参数：HEFA 为 70%、GFT 为 13%、AtJ（乙醇至 SAF）为 50%。在此设定下，虽然主产品收率较高，副产品产出显著减少，为简便计算，因此本研究未将副产品收益纳入成本测算。

4.2.1 中国

在中国 SAF 生产的格局中，不同技术路线的经济性呈现出了较大的差异。目前，利用废弃油脂的 HEFA 路线（约为 11308 元 / 吨）具有一定的成本优势。考虑到原料市场竞争格局的不确定性，以及 GFT 技术在处理低成本废弃物方面的潜力及预期的规模效应，到 2030 年，GFT 路线的成本竞争力将大大增强，其中以 MSW 为原料的生产方式成本将下降至 11000 元 / 吨以下（尽管 MSW 的应用还面临总体资源供应能力相对较少，规模化发展难度较大等其他实际难题），而其他原材料为依托的 GFT 路线 SAF 成本也将逐步逼近 HEFA。相比之下，AtJ 技术路线的成本虽然也会有所下降，但短期内经济性改善空间仍然相对有限。

• HEFA

HEFA 技术路线中，UCO 的价格是影响其 SAF 生产成本的最核心要素。为保障国内生物燃料产业的原料供给、促进产业向高附加值深加工转型，中国政府于 2024 年底取消了原料出口退税政策，鼓励 UCO 国内加工。加之美国最新政策取消了对进口中国 UCO 的补贴，国内 UCO 市场目前呈现以出口欧洲为主，国内 SAF 生产商需求快速增长的整体格局。近期市场数据表明，中国国内 UCO 价格在 5500–6500 元 / 吨区间。⁹²

在资本投入方面，根据实际调研，综合镇海、君恒等生产商对外披露的投资成本，HEFA 路径每吨 SAF 产能的资本投入约为 7500 元。假设项目折旧年限为 15 年，融资成本为 4%，且工厂处于满负荷生产状态，由此估算每生产一吨 SAF 所需的资本性支出（CAPEX）约 675 元人民币。

此外，包括电力、氢气和其他原料等在内的运营成本（OPEX）为 1776 元 / 吨 SAF。初步计算得出 HEFA 路线当前的生产总成本约为 11308 元 / 吨，其中原料约占 76%。展望 2030 年，SAF 产业规模的扩大有望带来一定的规模效应，从而降低部分 CAPEX，而随着中国氢能产业及装置运行的优化，预计 OPEX 中的用氢成本将少许降低。同时综合考虑油脂资源稀缺性，欧盟针对生物柴油的反倾销政策、美国《大而美法案》设定的原料贸易壁垒，还有来自印尼、马来西亚等国的棕榈油废料的竞争等对油脂原料的叠加影响，预计 2030 年中国废弃油脂类原料价格水平不会大幅上升。综合上述因素进行计算，预计 2030 年中国 HEFA-SAF 的生产成本较当前水平略有下降，约为 10977 元 / 吨 SAF。

图表 30 中国HEFA-SAF成本

原料类别	原料成本范围中位数 (元/吨SAF)	CAPEX (元/吨SAF)	OPEX(包括电力、氢气和其他 原料) (元/吨SAF)	总成本 (元/吨SAF)
UCO/动物脂肪	8857	675	1776	11308

图表 31 2030年中国HEFA-SAF成本预测

原料类别	原料成本范围中位数 (元/吨SAF)	CAPEX (元/吨SAF)	OPEX(包括电力、氢气和其他原 料) (元/吨SAF)	总成本 (元/吨SAF)
UCO/动物脂肪	8857	607	1513	10977

- **GFT/MtJ^{vi}**

GFT 路线能够利用多种生物质原料，包括农林废弃物、能源作物和 MSW。由于此类原材料运输困难，很难形成大区域市场，因此其收购价格在不同地区差别显著。本研究选取了较为典型的内陆城市周边原材料价格，能为大多数类似生产企业提供参考。基于本报告调研，农林废弃物干基到场价格约 500–600 元 / 吨左右；MSW 的到场价格相对较低，约 300 元 / 吨，若技术上能克服 MSW 成分复杂造成运行不稳定的固有缺点，则将具有一定成本优势；能源作物成本与农林废弃物近似，目前国内芦竹及其他能源作物的成本同样约为 300 元 / 吨。此外，GFT 技术所使用的农林废弃物等原料通常需要分拣、破碎、烘干等处理环节，综合考虑这些因素，这些环节价格大致与原料本身价格相当，因此综合计算，每生产一吨 SAF 需要投入的原料收购、收集、处理成本大约为 4615 (MSW) -9231 (林业废弃物) 元 / 吨 SAF。

结合文献和实地调研的结果，GFT 路线每吨 SAF 产能的资本投入约为 49294 元 / 吨。⁹³ 结合工厂生产的一般情况，本研究以折旧期限 15 年、融资成本 4%、且工厂满负荷生产为前提假设，估算得出每生产一吨 SAF 所需的 CAPEX 为 2955 元人民币。此外，计算人力、电力、氢气和其他原料的成本，GFT 技术的 OPEX 大约为 4008 元 / 吨。

综合上述原料成本范围中位数、资本摊销、OPEX 后，当前 GFT 路线生产 SAF 的总成本据估算约为 11579 (MSW) -16194 (林业废弃物) 元 / 吨 SAF。

到 2030 年，GFT 路线的 CAPEX 和 OPEX 有望降低。原料成本范围中位数仍是总成本的主要影响因素，原材料收集体系的建立和相关技术的成熟，有希望扩大原料收集范围、减少在原材料收集和处理阶段的投入，进而压低原料成本范围中位数。如果不考虑 MSW 这一原料，2030 年时预计主流的 GFT 项目生产成本约为 13000 元 -14500 元 / 吨 SAF。

^{vi} MtJ 路线的综合成本一般比 FT 路线略高，但基本处于同一区间。为方便起见，本章中以 FT 路线成本测算为主。

与 HEFA 路线的生产成本相比，当前多数 GFT 路线的成本竞争力仍有待提高，利用 MSW 作为原料的 GFT 路线显示出较明显的成本优势，但 MSW 原料成分复杂、单一种类总量有限的特点使其很难扩大生产，且技术发展进度仍存在较大不确定性。目前，基于 MSW 的 SAF 生产多处于实验室或中试阶段，尚未完成对 GFT 工艺稳定性及杂质处理能力的规模化验证。同时，MSW 中可利用的有机成分依赖于高效的分类回收体系，其实际可得性受到垃圾处理政策、回收网络完善度及与其他行业的竞争等多重因素影响，资源供应的持续性难以保障。因此，尽管本研究基于 MSW 原料价格测算出的 GFT-SAF 成本相对较低，但在技术与资源可用性尚不明朗的情况下，仍需保持谨慎态度。

不过随着生物质预处理和 GFT 合成技术的进一步优化，以及规模化生产进程的逐步加速，GFT 路线的成本经济性将逐步接近甚至超过 HEFA。由于 GFT 路线的原料可用范围更为广阔，若能优化生物质原料的收集和预处理流程、进一步降低农林废弃物等原材料的综合成本，GFT 路线很有可能成为未来中国 SAF 生产的主流技术路线之一。

图表 32 中国GFT-SAF成本

原料类别	原料成本范围中位数 (包括收集处理成本) (元/吨SAF)	CAPEX (元/吨SAF)	OPEX (包括电力、氢气和其他原料) (元/吨SAF)	总成本 (元/吨SAF)
农业废弃物	7692	2955	4008	14656
林业废弃物	9231	2955	4008	16194
能源作物	8462	2955	4008	15425
MSW	4615	2955	4008	11579*

图表 33 2030年中国GFT-SAF成本预测

原料类别	原料成本范围中位数 (包括收集处理成本) (元/吨SAF)	CAPEX (元/吨SAF)	OPEX (包括电力、氢气和其他原料) (元/吨SAF)	总成本 (元/吨SAF)
农业废弃物	6923	2660	3498	13082
林业废弃物	8308	2660	3498	14466
能源作物	7615	2660	3498	13774
MSW	4154	2660	3498	10312*

* MSW呈现出更低的总成本主要来源于其本身作为原料成本范围中位数更加低廉，但目前包括中国在内的世界各国的以MSW为原料通过气化+GFT方式合成生物燃料的技术尚处于早期阶段，工业化过程中仍存在较多问题，实际成本还需考虑解决这些问题可能耗费的其它的未知但必要发生的CAPEX和OPEX成本。

- **AtJ**

AtJ 路线以农业废弃物、林业废弃物、能源作物等多种生物质原料为生产原材料，该路线将上述原料经水解、发酵等步骤转化成乙醇，再通过 AtJ 技术（脱水、低聚、加氢 / 分馏）最终转化为 SAF。与 GFT 路线类似，农林废弃物等原料在收集处理过程中也需要投入额外的成本，不过乙醇发酵水解对原料一致性的要求比生物质气化技术的要求略低，可以省去部分筛选、预处理流程，因此相关成本也比 GFT 路线下低约 50%。因此，调研显示，生物质原料制得的纤维素乙醇成本范围中位数约 7050 元 / 吨，结合 AtJ 路径下的原料转化率，每生产一吨 SAF 的乙

醇原料成本范围中位数在 14000 元左右。

在资本投入方面，根据估算，AtJ 路线下每生产一吨 SAF 所需的 CAPEX 约为 1798 元（仅计算乙醇 – SAF 步骤中的 CAPEX）。OPEX 成本包含电力、氢气、人力等，约 1590 元 / 吨 SAF。综合考虑上述原料成本范围中位数、资本摊销、OPEX 后，估算得到当前 AtJ 路线生产 SAF 的总成本约为 17500–18000 元 / 吨 SAF。

展望 2030 年，AtJ 路线的 CAPEX 和 OPEX 均有一定下降空间，这将进一步提升其经济性，且原材料收集体系的建立、纤维素水解发酵技术的进展也可以进一步减低成本。预计届时 SAF 总成本约为 16000 元 / 吨。

图表 34 中国AtJ-SAF成本估算

原料类别*	乙醇成本范围中位数 (包括收集处理成本) (元/吨SAF)	CAPEX(元/吨SAF)	OPEX(包括电力、氢气 和其他原料) (元/吨SAF)	总成本 (元/吨SAF)
农业废弃物	14049	1798	1590	17438
林业废弃物	14683	1798	1590	18072
能源作物	14567	1798	1590	17955

* 工业尾气制乙醇的成本不在本报告测算考虑内

图表 35 2030年中国AtJ-SAF成本预测

原料类别*	乙醇成本范围中位数 (包括收集处理成本) (元/吨SAF)	CAPEX(元/吨SAF)	OPEX(包括电力、氢气 和其他原料) (元/吨SAF)	总成本 (元/吨SAF)
农业废弃物	13113	1619	1349	16080
林业废弃物	13705	1619	1349	16672
能源作物	13595	1619	1349	16563

* 工业尾气制乙醇的成本不在本报告测算考虑内

4.2.2 美国

美国的情况与中国有一定的区别，由于原料的可获得性与成本是决定各路线经济性的核心变量，在美国 UCO 进口受限、国内原料竞争加剧的背景下，以本土原料生产的 HEFA 基本上在 17000 元 / 吨以上。⁹⁴ 利用 MSW 的 GFT 路线展现出显著的成本优势，当前 12500 元 / 吨，2030 年有望降至约 11000 元 / 吨，但如前文所述，MSW 并不适宜大规模的工业化生产，当前技术下 MSW 原料应用难度偏高，美国第一家以 MSW 为原料的 SAF 工厂已因原料获取等问题关停。相比 GFT 技术，AtJ 技术更可能成为未来主流的 SAF 生产路线。鉴于美国本土 UCO 和其他废弃油脂类资源的匮乏，未来依靠纤维素乙醇生产的 SAF 可能成本甚至低于 HEFA，2030 年时预计成本大约为 16000 元 / 吨 SAF。

• HEFA

由于美国 SAF 生产对 UCO 的进口依赖程度较强，新的政策趋势对于其原料成本范围中位数具有一定的影响。过去美国的 SAF 生产主要依赖更为经济的从亚洲进口的 UCO，但随着亚洲 UCO 出口收紧（如中国取消 UCO 出口退税）、美国增加对华关税并且不允许使用来自非美加墨地区的原料，美国将更加依赖国内供应。然而，美国本土 UCO 不仅量有限，且早已是生物柴油产业激烈争夺的对象，原料成本范围中位数和保障面临严峻挑战。根据

Argus 市场数据，美国 UCO 和动物脂肪的市场价格分别约为 10270 元人民币 / 吨和 10800 元 / 吨。⁹⁵

CAPEX 方面，基于对 World Energy 加州 Paramount 项目公开信息的分析，估算 HEFA 设施的单位产能投资约为 10517 元 / 吨。若假设折旧期限为 15 年、融资成本为 4% 且工厂能实现满负荷运行，则分摊至每吨 SAF 产品上的资本成本约为 946 元。综合考虑上述原料成本范围中位数、资本摊销、OPEX 后，当前 HEFA 路线生产 SAF 的总成本约为 18000 元 / 吨。展望 2030 年随着技术的持续成熟和规模化效应的显现，单位 CAPEX 和 OPEX 将略有下降。综合这些趋势，预计届时 HEFA SAF 的总成本将调整至约 17300 元 / 吨。

图表 36 美国HEFA-SAF成本估算

原料类别	原料成本范围中位数 (元/吨SAF)	CAPEX (元/吨SAF)	OPEX(包括电力、氢气和其他原料) (元/吨SAF)	总成本 (元/吨SAF)
UCO	14671	946	2198	17815
妥尔油	15000	946	2198	18144
动物脂肪	15412	946	2198	18556

图表 37 2030年美国HEFA-SAF成本预测

原料类别	原料成本范围中位数 (元/吨SAF)	CAPEX (元/吨SAF)	OPEX(包括电力、氢气和其他原料) (元/吨SAF)	总成本 (元/吨SAF)
UCO	14671	851	1829	17352
妥尔油	15000	851	1829	17681
动物脂肪	15412	851	1829	18094

- **GFT**

在美国，典型的农业废弃物、林业废弃物以及能源作物的源头采购成本估计在 770 至 875 元 / 吨之间。⁹⁶ MSW 采购成本则仅 210 元 / 吨。此外，因农林等废弃物原料仍需要分拣、干燥、破碎，会显著增加这一部分的成本。不过，由于美国的大农场模式较为成熟，庄稼种植模式利于农业废弃物的收集和处理，因此相关成本在原料最终成本中的占比相比中国更低，经计算约为 37%。

CAPEX 方面，结合 WEF 的估算和其他文献的研究结论，GFT 设施的单位产能投资约为 50400 元 / 吨。在前述特定的折旧和融资假设下，分摊至每吨 SAF 产品上的资本成本约 4533 元。综合考虑后，采用农林废弃物或能源作物为原料的 GFT 路线，其 SAF 总成本预计在 19000–21000 元 / 吨左右。若改用成本极低的 MSW 作为原料，在技术可行的前提下，总成本预计可大幅降低至约 12500 元 / 吨。

预计 2030 年，采用农林废弃物或能源作物为原料的 GFT 路线 SAF 总成本为 17600–19000 元 / 吨，MSW 为原料的 SAF 总成本约 11000 元 / 吨。不过依然需要强调，MSW 原料具有来源不确定、成分复杂、单一品种总量较小的缺点，尽管收购成本较低，但并不适合大规模生产。

图表 38 美国 GFT-SAF 成本估算

原料类别	原料成本范围中位数 (包括收集处理成本) (元/吨SAF)	CAPEX (元/吨SAF)	OPEX(包括电力、氢气 和其他原料) (元/吨SAF)	总成本 (元/吨SAF)
农业废弃物	9477	4533	5370	19380
林业废弃物	10769	4533	5370	20672
能源作物	10092	4533	5370	19995
MSW	2585	4533	5370	12488*

图表 39 2030年美国GFT-SAF成本预测

原料类别	原料成本范围中位数 (包括收集处理成本) (元/吨SAF)	CAPEX (元/吨SAF)	OPEX(包括电力、氢气 和其他原料) (元/吨SAF)	总成本 (元/吨SAF)
农业废弃物	8885	4080	4649	17614
林业废弃物	10096	4080	4649	18825
能源作物	9462	4080	4649	18191
MSW	2423	4080	4649	11152*

* MSW 呈现出更低的总成本主要来源于其本身作为原料成本范围中位数更加低廉, 但目前包括中国在内的世界各国的以 MSW 为原料通过气化 +GFT 方式合成生物燃料的技术尚处于早期阶段, 工业化过程中仍存在较多问题, 实际成本还需考虑解决这些问题可能耗费的其它的未知但必要发生的 CAPEX 和 OPEX 成本。

- AtJ

美国是乙醇大国, 美国当前玉米乙醇价格低廉 (约 1650 元 / 吨) ,⁹⁷ 但普遍不被视为满足国际 SAF 可持续性要求的合格原料, 因此该价格对于评估可持续 AtJ 成本的参考意义有限。不过即便如此, 美国在纤维素乙醇原料生产方面依然具有一定优势, 美国成熟的机械化、农场化农业生产模式能够廉价、高效地处理农业废弃物, 进而减少原材料收集、处理阶段的支出, 同时得益于乙醇产业的规模效应, 纤维素乙醇的综合生产成本预计也将低于中国。综合估计纤维素乙醇的成本约为 13500 元 / 吨 SAF。

资本支出方面, AtJ 路线通常面临比 HEFA 更高的投资强度, 基于前述的折旧和融资假设, 估算得到每吨 SAF 产品分摊的资本成本约为 1892 元。综合考虑高昂的可持续原料成本范围中位数、资本摊销、运营成本以及其他产物的价值后, 当前基于非粮可持续原料的 AtJ-SAF 总成本约 17000 元 / 吨。运营支出方面, 乙醇成本范围中位数已经覆盖了农林废弃物的预处理成本, 因此 AtJ 的 OPEX 比同样使用农林废弃物的 GFT 要低一些, 综合计算后得出, OPEX 成本约为 1813 元 / 吨 SAF。

展望至 2030 年, 尽管原料成本范围中位数压力可能持续存在, 但随着 AtJ 技术的进一步成熟、工艺优化以及规模化效应显现, 预计单位资本支出和运营成本均呈现下降趋势。综合判断, 届时 AtJ-SAF 的总成本有望降至 16500 元 / 吨左右。

图表 40 美国 AtJ-SAF 成本估算

原料类别	乙醇成本范围中位数 (包括收集处理成本) (元/吨SAF)	CAPEX (元/吨SAF)	OPEX(包括电力、 氢气和其他原料) (元/吨SAF)	总成本 (元/吨SAF)
农业废弃物	13474	1892	1813	17179
林业废弃物	13876	1892	1813	17581
能源作物	13888	1892	1813	17593

图表 41 2030年美国AtJ-SAF成本预测

原料类别	乙醇成本范围中位数 (包括收集处理成本) (元/吨SAF)	CAPEX (元/吨SAF)	OPEX(包括电力、 氢气和其他原料) (元/吨SAF)	总成本 (元/吨SAF)
农业废弃物	12913	1703	1489	16104
林业废弃物	13298	1703	1489	16489
能源作物	13309	1703	1489	16500

- 考虑联邦层面政策优惠后的 SAF 成本

如前文 2.2 节所述，美国 SAF 在联邦层面享受两项政策优惠，其一是 45Z 条款 “清洁燃料生产抵免” (Clean Fuel Production Credit, CFPC)，其二是 RFS 中的 RIN 信用额度。

(1) 45Z 条款

CFPC 自 2025 年 1 月 1 日起生效，根据《大而美法案》对《通胀削减法案》原有条款的修改，目前有效期将持续至 2029 年底。该条款为包括 SAF 在内的清洁燃料生产提供了显著的税收激励，SAF 生产商可根据其温室气体减排效益获得税收减免：在 2025 年 12 月 31 日前金额最高每加仑 1.75 美元，2026 年起金额最高为 1 美元。适用于 SAF 的 CFPC 金额可根据以下公式计算：

$$CFPC = \frac{(EF_{baseline} - EF_{SAF})}{EF_{baseline}} * \text{Base credit}$$

其中， $EF_{baseline}$ 是基准燃料的碳排放因子，设定为 50 kg CO₂e/mmBTU， EF_{SAF} 是特定 SAF 生命周期内的碳排放因子，单位是 kg CO₂e/mmBTU； Base credit 是基准抵免额，设定为 1.75 美元 / 加仑 (2025 年) 或 1 美元 / 加仑 (2026 年 - 2029 年)。

基于前文 3.2 节中针对不同技术路径 SAF 的可持续性评估结果 (即碳排放因子)，本报告具体测算在 45Z 条款下，各项代表性技术路径的 SAF 在美国市场可获得的税收抵免额度，如图表 42 所示。此外，《大而美法案》通过后，由粮食作物原料土地利用变化导致的碳排放不再被计算其中，因此这一类 SAF 将获得更多的减免额度。

图表 42 在美国《大而美法案》45Z 条款政策下, 不同技术路线下的 SAF 的税收抵免额度^{vii}

SAF种类	原材料类别	碳排放 (g CO ₂ e/MJ)	碳排放 (kg CO ₂ e/mmbtu)	CFPC 2025 (美元/加仑)	CFPC 2026–2029 (美元/加仑)
HEFA	UCO	13.9	14.7	1.24	0.71
	动物脂肪	22.5	23.7	0.92	0.53
GFT	农废	7.7	8.1	1.47	0.84
	林废	8.3	8.8	1.44	0.82
	能源作物 (美国柳枝稷)	6.6	7.0	1.51	0.86
AtJ	农废 (经乙醇转化工艺)	24.6	26.0	0.84	0.48
	林废 (经乙醇转化工艺)	24.9	26.3	0.83	0.47
	能源作物 (美国芒草, 经异丁 醇转化工艺)	0	0	1.75	1

不同技术路径的 SAF 可获得的税收抵免额度存在较大差异, 这主要取决于其生命周期碳排放强度。

(2) RIN 信用额度

2025 年第一季度 D4 类别的 RIN 价格在 0.7 美元上下波动。⁹⁸ 每生产 1 加仑符合条件的 SAF 通常可以生成 1.6 个 D4 类别的 RIN。⁹⁹ 因此, 每生产 1 加仑 SAF 可以获得 1.12 美元的 RIN 信用额度, 即每生产 1 吨 SAF 可以获得 2674 元 RIN 信用额度。此外, 按照 EPA 在 2025 年 6 月提出的修正提议, 未来进口原料生产的可持续燃料只能产生 50% 的 RIN 值, 即使用进口原料的生产商获得的 RIN 收入将减半。

然而, 需要强调的是, RIN 的市场价格具有波动性, 受多种市场因素影响。因此, 虽然本估算采用了固定值, 但实际运营中 RIN 收益的变化将为 SAF 的最终成本带来一定的不确定性。未来 RIN 市场的走向将是影响美国 SAF 产业经济性的关键变量之一。

综合联邦层面的这两种政策优惠, 图表 43 展示了抵免优惠后的 SAF 生产成本。需要指出的是, 此处的成本分析为考虑美国本土原料条件下的“SAF 生产总成本扣除优惠抵免额”, 暂未考虑其他州级补贴政策的叠加效应等复杂因素的影响, 如明尼苏达州和伊利诺伊州可以额外为在其州境内生产和混合的 SAF 提供每加仑 1.5 美元的税收抵免。加州和华盛顿州允许 SAF 生产商出售其碳信用额度来获取额外收益等。若 SAF 项目在美国这些州生产, 还可以进一步缩减成本。

^{vii} 美元兑人民币汇率按 7.2 计算; SAF 密度按 0.80 kg/L 估算

图表 43 考虑联邦政策优惠后的美国 SAF 成本

SAF种类	原材料类别	总成本 (元/吨)	CFPC 2025 (元/吨)	CFPC 2026–2029 (元/吨)	RIN收益 (元/吨)	政策优惠后SAF 成本2025 (元/吨)	政策优惠后SAF 成本2026–2029 (元/吨)
HEFA	UCO	17815	2953	1657	2674	12188	13484
	动物脂肪	18556	2194	1237		13688	14645
GFT	农废	19380	3499	1960	2674	13207	14746
	林废	20672	3446	1913		14552	16085
	能源作物	19995	3596	2007		13725	15314
AtJ	农废	17179	2009	1120	2674	12496	13385
	林废	17581	1983	1097		12924	13810
	能源作物	17593	5121	2333		9798	12586

由图表 43 的估算结果可见，45Z 条款提供的税收抵免和 RFS 的 RIN 信用额度收益对降低美国各类技术路径下的 SAF 生产成本具有显著的积极效应。HEFA 路径利用 UCO 作为原料生产 SAF，在政策优惠后展现出最优的成本竞争力，估算成本约为 12188 元 / 吨 (2025 年基准)，或 13484 元 / 吨 (2026–2029)。表现同样突出的是 AtJ 路径下利用美国芒草这种能源作物经异丁醇转化工艺制备的 SAF，得益于其显著的负碳排放特性，该路径能够获得最高的税收抵免上限，加之 RIN 收益，其成本可降至约 9798 元 / 吨 (2025) 或 12586 元 / 吨 (2026–2029)，在美国国内市场的竞争力显著增强。相比之下，尽管 GFT 路径也能获得可观的政策优惠，但由于其初始生产总成本较高，最终成本仍普遍较高。

总体而言，45Z 条款通过与碳排放强度直接挂钩的差异化补贴机制，不仅全面降低了 SAF 的生产成本，更有力地引导行业向环境效益更优的技术路径和原料结构倾斜。RIN 作为另一项关键的联邦层面激励措施，进一步降低了所有技术路径的 SAF 净成本。对于原料成本范围中位数较高或碳减排潜力相对有限的路径，即使享受政策优惠，其经济性挑战依然存在，这预示着未来美国 SAF 产业的发展将更加注重低碳 / 负碳原料的获取与转化技术的创新突破。

4.2.3 巴西

巴西目前没有 SAF 项目投产，但其发达的生物质燃料产业为 SAF 产业未来的发展奠定了坚实的基础。根据公开资料算，巴西的 HEFA-SAF 将主要以动物脂肪为原料，成本约为 13800 元 / 吨。而相比 HEFA，巴西 AtJ 的成本可能更具优势，预计到 2030 年时可能降至 10500 元 / 吨。鉴于目前巴西已经具备了商业化生产纤维素乙醇的能力，AtJ 产能的前景十分乐观，且随着 AtJ 技术及其上下游产业链趋于成熟，巴西丰富的农林废弃物资源能够支撑起庞大的 AtJ 产能，继续推动其成本持续降低。

- HEFA

巴西是 FAME 生物柴油的主要生产国之一，因此与油脂相关的配套产业相对成熟，原材料成本也较为透明。动物脂肪（比如牛脂和猪脂）是除大豆油外最常见的生物柴油原料，根据 2025 年巴西出口数据统计，其离岸价格大约为 1050 美元 –1080 美元 / 吨，约合 7500 元 –7900 元 / 吨。UCO 和妥尔油在巴西 FAME 产业原料中的占比偏低，

价格也相对不透明，根据估算 UCO 成本大约为 9000 元人民币 / 吨，妥尔油则为 8400 元人民币 / 吨。

资本投入方面，根据官方统计，目前已开始建设的三座 HEFA/HVO 工厂规划总产能约 88 万吨，总投资 87 亿巴西雷亚尔。在折旧期限为 15 年、融资成本 4%、且工厂满负荷生产的前提假设下，估算可得每生产一吨 SAF 需要投入 CAPEX 约 1133 元人民币。

综合计算，以动物脂肪为原料生产 HEFA 的成本最低，为 13800 元 / 吨。其他原料成本范围中位数则偏高，约合 15000–16000 元 / 吨左右。到 2030 年时，随着生物质产业规模的持续扩大，预计 HEFA-SAF 的总成本将呈现小幅下降趋势。

图表 44 巴西HEFA-SAF成本估算

原料类别	原料成本范围中位数 (元/吨SAF)	CAPEX (元/吨SAF)	OPEX(包括电力、氢气和其他原料) (元/吨 SAF)	总成本(元/吨SAF)
UCO	12857	1133	2205	16196
妥尔油	12000	1133	2205	15339
动物脂肪	10500	1133	2205	13839

图表 45 2030年巴西HEFA-SAF成本预测

原料类别	原料成本范围中位数 (元/吨SAF)	CAPEX (元/吨SAF)	OPEX(包括电力、氢气和其他原料) (元/吨 SAF)	总成本(元/吨SAF)
UCO	12857	1020	1883	15760
妥尔油	12000	1020	1883	14903
动物脂肪	10500	1020	1883	13403

- AtJ

巴西同样是生物质乙醇的生产大国，成熟的产业链有助于减低 AtJ-SAF 成本。AtJ 的生产工艺更复杂，环节也更多，总体上可以分为纤维素水解发酵制乙醇和乙醇低聚，加氢分馏几部分。在纤维素制乙醇阶段，巴西企业 Raizen 已经实现了量产，未来还将继续扩充产能。根据其资料公开，Raizen 新规划的 8200 万升产能工厂总投资约 1 亿巴西雷亚尔，约合每一吨纤维素乙醇产能需要投资大约 19000 元。甘蔗渣、林业废弃物、农业秸秆等主要原材料的价格则在 130 元 -400 元 / 吨不等。如果考虑到原料的预处理成本，则最终每吨纤维素乙醇的价格大约为 4000 元 - 5200 元 / 吨，这与 Raizen 先前公开的 2.17 美元 / 加仑的成品价格预测基本相符。¹⁰⁰

乙醇制 SAF 装置，巴西目前没有产能可供参考，美国类似规模设施的投资成本一般在 3000-3500 美元 / 吨产能，但由于巴西相关技术的缺失，因此 CAPEX 可能略高于美国。按照前述假设计算，每生产一吨 SAF 的 CAPEX 大约为 2249 元 / 吨 SAF。¹⁰¹ 据此估算，以当前的产业条件和原材料价格，AtJ 成品价格大约在 12000 元 -14300 元 / 吨，而到 2030 年时，随着巴西纤维素乙醇产能的快速增加和迭代，AtJ 成本可能会有所下降，约为 10500 元 - 12700 元 / 吨，届时 AtJ-SAF 将比 HEFA-SAF 更具吸引力。

图表 46 巴西 AtJ-SAF 成本估算

原料类别	乙醇成本(包括收集处理成本)(元/吨 SAF)	CAPEX(元/吨 SAF)	OPEX(包括电力、氢气和其他原料)(元/吨 SAF)	总成本(元/吨 SAF)
林业废弃物	8139	2249	1680	12067
其他农业废弃物	8918	2249	1680	12846
蔗渣残余物	10404	2249	1680	14332

图表 47 2030年巴西AtJ-SAF成本预测

原料类别	乙醇成本范围中位数(包括收集处理成本)(元/吨SAF)	CAPEX(元/吨SAF)	OPEX(包括电力、氢气和其他原料)(元/吨SAF)	总成本(元/吨SAF)
林业废弃物	7119	2024	1430	10573
其他农业废弃物	7866	2024	1430	11319
蔗渣残余物	9290	2024	1430	12743

4.2.4 印度

如前文所述，预计至 2030 年，印度的生物质 SAF 主要为 HEFA 和 AtJ 两条技术路径。相比之下，印度的煤液化产业仍处于早期发展阶段，生物质气化技术尚不成熟，^{viii} 因此 GFT 技术的积累相对有限，且投资门槛较高，在短期内尚不具备推广优势。¹⁰²

在 HEFA 路径下，SAF 在印度的生产成本主要受原料价格波动影响，特别是废弃油脂等主要原料市场的供需关系。而对于 AtJ 路径而言，其生产成本更依赖于产业链的成熟程度与配套基础设施的完善程度，尤其是在资本支出方面，产业化程度越高，未来 SAF 的成本经济性提升越为显著。

- **HEFA**

由于生物柴油掺混政策，印度的道路交通燃料领域已形成一定规模的油脂加工利用产业，具备一定的数据透明度，因此测算 HEFA 路径下的生物质 SAF 生产成本相对可靠。目前，印度生物柴油主要以 UCO、非食用工业油脂及动物脂肪为原料。综合考虑可持续性与原料可得性，本研究选取 UCO 和动物脂肪两类作为测算对象。在原料成本范围中位数方面，印度因文化因素普遍不将牛油用于食用，形成了一定的出口渠道。根据印度 2024 年出口数据，牛油的离岸价格约为 890–990 美元 / 吨，¹⁰³ 折合人民币约 6500–7300 元 / 吨。UCO 在印度国内的市场价格则在 6400–7300 元 / 吨之间。¹⁰⁴ 按 HEFA 工艺 70% 的产出比例计算，单位 SAF 所需原料成本范围中位数为 9400–9694 元 / 吨。

在资本支出方面，参考麦肯锡与世界经济论坛的相关研究，印度 HEFA 工厂的单位产能投资约为 1850 美元 / 吨。¹⁰⁵ 若结合本成本分析假设的装置规模、折旧年限，折算后单位 SAF 的 CAPEX 约为 1164 元 / 吨。

综合来看，采用动物脂肪或 UCO 作为原料时，HEFA 路径下的 SAF 生产成本约为 13000 元 / 吨。其中，原料成本范围中位数占比最高。展望 2030 年，随 SAF 产业的规模化发展和原料收集体系的完善，HEFA-SAF 的生产成本将略有下降。

^{viii} 印度政府于 2022 年才设定了到 2030 年建成 100 万吨煤液化产能的目标，这意味着印度目前在该技术领域的积累比较有限。

图表 48 印度 HEFA-SAF 成本估算

原料类别	原料成本范围中位数 (元/吨SAF)	CAPEX (元/吨SAF)	OPEX(包括电力、氢气和其他原料) (元/吨 SAF)	总成本(元/吨SAF)
UCO	9694	1164	2114	12973
动物脂肪	9400	1164	2114	12678

图表 49 2030年印度HEFA-SAF成本预测

原料类别	原料成本范围中位数 (元/吨SAF)	CAPEX (元/吨SAF)	OPEX(包括电力、氢气和其他原料) (元/吨SAF)	总成本(元/吨SAF)
UCO	9694	1048	1840	12583
动物脂肪	9400	1048	1840	12288

- AtJ

印度具备丰富的甘蔗乙醇产业基础，在制糖和乙醇过程中会产生大量蔗渣，可作为 AtJ 路径的原料来源；此外，印度农业废弃物（如稻壳、秸秆）产量也十分可观。根据公开数据，2024 年印度蔗渣的价格约在 213–342 元 / 吨，¹⁰⁶ 农业废弃物约 210 元 / 吨。¹⁰⁷ 考虑到 AtJ 工艺流程长，原料消耗量往往较高：首先，纤维素或淀粉原料需发酵制成醇类，随后，这些醇类还要经历脱氧、缩聚、加氢和分馏等多道催化工序。若考虑到原料收集及预处理成本，综合计算得出，AtJ 路径下，每生产一吨 SAF 需要纤维素乙醇成本范围中位数 8700–9400 元 / 吨。

在资本支出方面，结合麦肯锡与世界经济论坛的报告数据和其他相关文献，完整 AtJ 工厂（含发酵、脱氧、缩聚、加氢直至分馏）的单位产能投资约为 6250 美元 / 吨。¹⁰⁸ 按 15 年折旧期与 4% 融资成本计算，折合人民币约 3934 元 / 吨 SAF。

将原料成本范围中位数与 CAPEX、OPEX 相加，则当前印度 AtJ 路径的综合生产成本估算约在 13400–13900 元 / 吨 SAF，理论上与 HEFA 相当。到 2030 年，随着印度纤维素乙醇及相关配套设施的成熟，发酵及下游催化步骤的效率有望显著提升，原料消耗比及能耗将进一步下降。届时，AtJ 路径的总生产成本有望降至约 12700–13300 元 / 吨 SAF。

图表 50 印度AtJ-SAF成本估算

原料类别	乙醇成本范围中位数 (包括收集处理成本) (元/吨SAF)	CAPEX(元/吨SAF)	OPEX(包括电力、氢气和其他原料) (元/吨SAF)	总成本(元/吨SAF)
农业废弃物	8726	3934	2222	14882
蔗渣残余物	9372	3934	2222	15528

图表 51 2030年印度AtJ-SAF成本预测

原料类别	乙醇成本范围中位数 (包括收集处理成本) (元/吨SAF)	CAPEX(元/吨SAF)	OPEX(包括电力、氢气和其他原料) (元/吨SAF)	总成本(元/吨SAF)
农业废弃物	8363	3541	1938	13842
蔗渣残余物	8982	3541	1938	14461

五、 未来全球SAF市场供需趋势预测 —2030

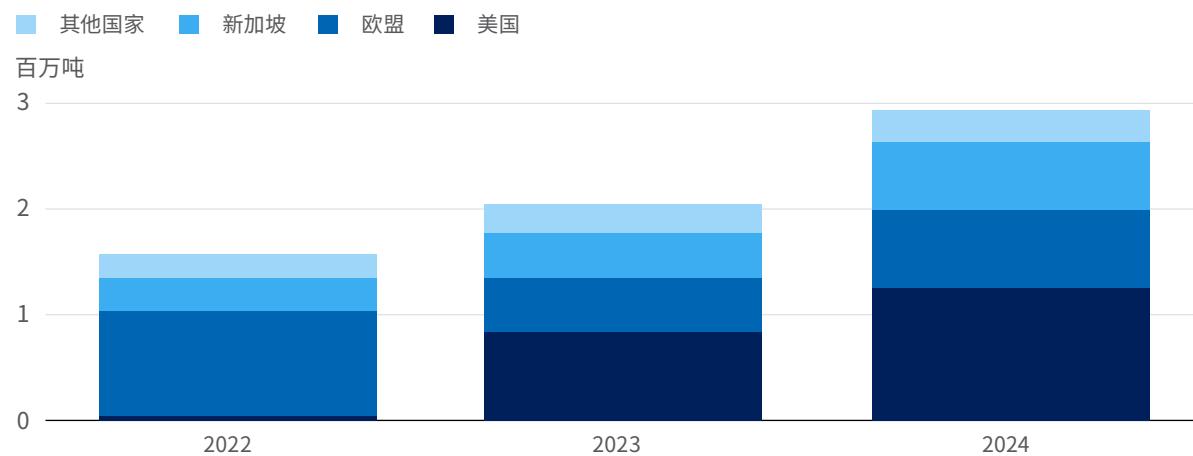
5.1 中国在当前全球 SAF 市场中扮演的角色

中国在全球生物质 SAF 市场中扮演着重要角色，既是 HEFA-SAF 的主要生产国之一，同时也是原材料餐厨废油的出口大国。自 2022 年起，随着中国出口 UCO 原料增加，伴随着全球 HEFA 产能快速增加，SAF 价格也自高点的 3500 美元 / 吨左右下降至 2025 年初的 1700 美元 / 吨左右，有效缓解了 SAF 价格过高的问题，促进了全球 SAF 的发展和应用。但 2024 年末以来，全球生物质原料与燃料市场多次受到政策冲击，随着中国及其他亚洲国家的原材料和生物质成品油进出口受阻，全球 SAF 市场格局逐渐出现了转变，中国在全球 SAF 市场中的角色很可能将从主要的原料出口商转变为成品 SAF 生产商。

2024 年，国内能够实现 HEFA 生产的企业有四家：中石化镇海炼化、怡思莱、河南君恒生物以及年末投产的嘉澳环保。其中镇海炼化作为国企主要服务国内市场，SAF 产品主要供给国内航司的 SAF 试点项目以及空客天津工厂等；怡思莱主要专注于 SAF 和 HVO 的海外出口，产品主要供给欧洲市场；君恒和嘉澳则同时供给国内和海外。产量上，通过汇总公开信息估计，截至 2025 年 6 月底，中国 SAF 已投产项目增至 8 个，产能达到 124 万吨 / 年，2025 年 1-6 月 HVO/SAF 出口总量也已经超过 33.84 万吨。

除了成品 SAF 出口，中国还是全球最主要的 UCO 出口国，过去几年中 UCO 出口量逐年上升，到 2024 年时，全年出口量已达到了 295 万吨。¹⁰⁹ 欧美是中国 UCO 的主要出口目的地国家，其中对美国 2024 年全年出口 127 万吨，占中国总出口量的 43%，¹¹⁰ 是中国当年 UCO 的最大买家。2022 年时，中美的 UCO 贸易总量还几乎可以忽略不计，但美国过去两年中出台的各类优惠政策极大地激发了产业热情，原材料进口量逐年增长。不过，随着中国在 2024 年底取消了 UCO 退税政策，以及 2025 年 1 月 10 日美国取消 45Z 条款中进口原料的优惠资格，加之随后关税战爆发，2025 年中美 UCO 贸易量已经缩减殆尽。¹¹¹

图表 52 中国UCO出口情况（百万吨）

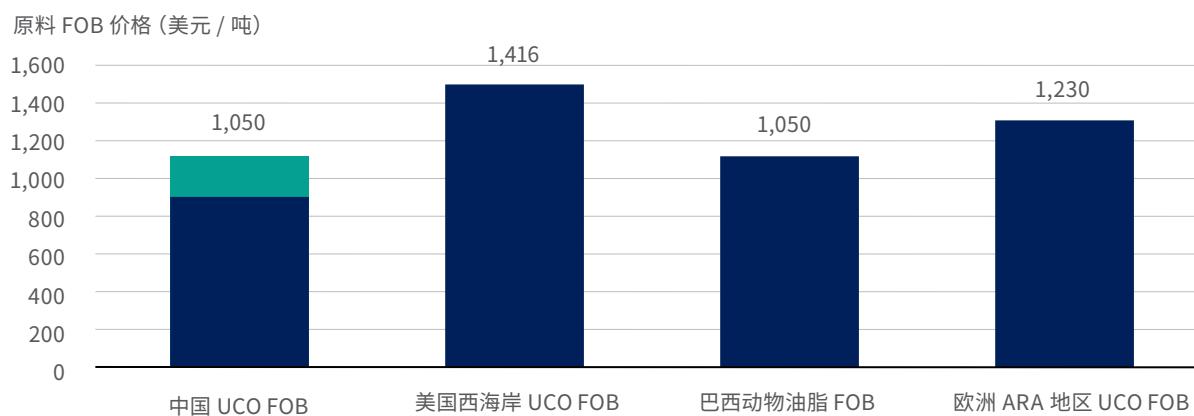


来源：S&P Global Market Intelligence Global Trade Atlas

欧洲曾经是中国最大的 UCO 买家，2022 年时从中国进口 UCO 逾 100 万吨，但受红海危机爆发、中国与美国等地 UCO 需求提高等因素的影响，2023 年欧洲进口总量大幅缩减。2023 年底，欧盟启动了对中国生物柴油产品的反倾销调查，并在 2024 年开始针对中国产生生物柴油征收额外关税，这一政策大幅提高了欧洲的生物柴油价格，迫使欧洲企业重新开始加大对 UCO 原材料的进口。2024 年全年，欧盟进口中国 UCO 共计 73 万吨，占中国出口总量的 39%。¹¹² 欧盟的反倾销政策和中国 2024 年底的取消退税政策共同推高了欧盟进口 UCO 的价格，2025 年初，中国离岸 UCO 价格已经抬升到了将近 1100 美元 / 吨的水平，大大推高了欧盟市场上 UCO 的价格，鉴于这一情况，欧洲未来可能需要寻求其他原材料种类或来源。¹¹³

总体来看，中国目前深度参与了全球 SAF 产业，欧美 SAF 产业链依赖中国提供的廉价 UCO 原料来生产 SAF。但未来，中国 UCO 出口在各种因素的影响下将大幅削减，加之印尼等亚洲主要 UCO 出口国也在着手限制本国的 UCO 和其他废弃油脂的出口，¹¹⁴ 欧美各国将不得不转而依靠价格更高、供给更不稳定的原材料来源，这将对全球 SAF 生产带来不利影响。不过从中国的角度来看，UCO 出口受阻意味着国内生产商能够获得更多的廉价原料，有利于扩大产业规模。

图表 53 2024年底全球主要HEFA原材料大致离岸价格（美元/吨）



来源: S&P、Argus

5.2 2030 全球 SAF 供给侧趋势预测

生物质 SAF 市场对贸易环境十分敏感，在国际贸易受阻时，单一国家很难独立发展 SAF 产业，发展进度将大幅放缓。尤其是原材料方面，一旦相关贸易暂停，全球 SAF 供需就将陷入“高需求国家高成本，低成本国家低需求”的矛盾处境中。

单纯从产能上限的角度分析，全球 SAF 产能潜力非常大。本篇报告着重关注的四国（中国、美国、巴西与印度）均拥有大量的废弃油脂资源，如果充分利用，理论上每年能够生产 SAF 752 万吨左右。SAF 产能方面，四国未来 5 年内将有一大批规划产能投产，中美两国规划产能更是将达到数百万吨级别，中国 HEFA/HVO 已宣布项目的规划产能已经超过 600 万吨，美国已宣布规划产能 660 万吨，甚至已经超出现有原材料供给的能力。

除 HEFA 外，其他生物质 SAF 技术路线也同样潜力巨大。对于巴西和印度，两国大规模种植的甘蔗等农业作物提供了数量可观且易于收集的纤维素残渣，非常适合用以开发生物质燃料；而中美两国庞大的国土面积和农业规模也为未来的 SAF 产业提供了近乎无限的可能性。如果各国已规划的其他 SAF 技术产能都能顺利落地，那么 2030 年总产能也将达到 490 万吨（不包括以粮食为主要原材料的产能）。

不过，理论产能落地投产还受到原材料价格、SAF需求、上下游产业链成熟度以及贸易环境等多方面因素的影响。

对于 AtJ、GFT 等先进技术，上游产业链的缺失有可能会大幅拖慢发展进程。以巴西为例，虽然巴西的甘蔗渣是理想的生物质原料，不仅产量巨大，且易于收集和处理，仅一种原料就有潜力带来超过 200 万吨的 AtJ-SAF 年产量，但由于纤维素水解技术难度较高，巴西纤维素水解产能提升缓慢，阻塞了后续 AtJ-SAF 的生产。美国也面临类似的问题，虽然美国全境已宣布的 AtJ 产能超过 200 万吨，但上游纤维素水解产能的缺失使得这些 AtJ 工厂未来短时间内只能用粮食乙醇做原料进行生产，而此类产品并不符合国际主流的可持续标准。

而对于主流的 HEFA 技术，原材料供给的不确定性将成为其发展的主要阻力。在 HEFA 市场中，需求较高的欧美国家普遍缺乏廉价、低碳的原材料，而成本较低的中、巴等国短时间又存在需求不足的问题。需求与供给的错配使得 HEFA 产业十分依赖稳定的国际贸易环境，而当前贸易乱象很可能扰乱过往 SAF 产业的全球配合，阻碍 SAF 产业的发展：

一方面，欧美市场获得原材料的难度将大大增加：尽管废弃油脂资源在全球广泛分布，但过去全球 SAF 市场主要依赖中国和其他亚洲国家提供的廉价且大量的废弃油脂资源。当亚洲国家原材料出口减少，欧美市场很难找到同样规模的替代品，很可能因面临“原料荒”而被迫暂停规划产能的开发或转而加大可持续性较差的农业作物原料的生产规模。

另一方面，其他国家的 SAF 企业也将面临需求不足的困境：以中国为例，国内目前需求较低，中国绝大多数 SAF 产量都用作出口欧洲。虽然欧洲目前没有针对 SAF 贸易设置障碍，但在中国收紧原材料出口、欧洲本土 SAF 产业受到多方面因素冲击的情况下，欧盟存在像生物柴油一样对 SAF 开展反倾销调查的可能，用以保护本土产业。¹¹⁵届时中国 SAF 企业将面临需求骤降的严峻挑战。因此从全球范围来看，若原材料相关贸易壁垒持续存在，则预计过去几年中 HEFA-SAF 的产量持续上升的势头在未来几年中将有所放缓。

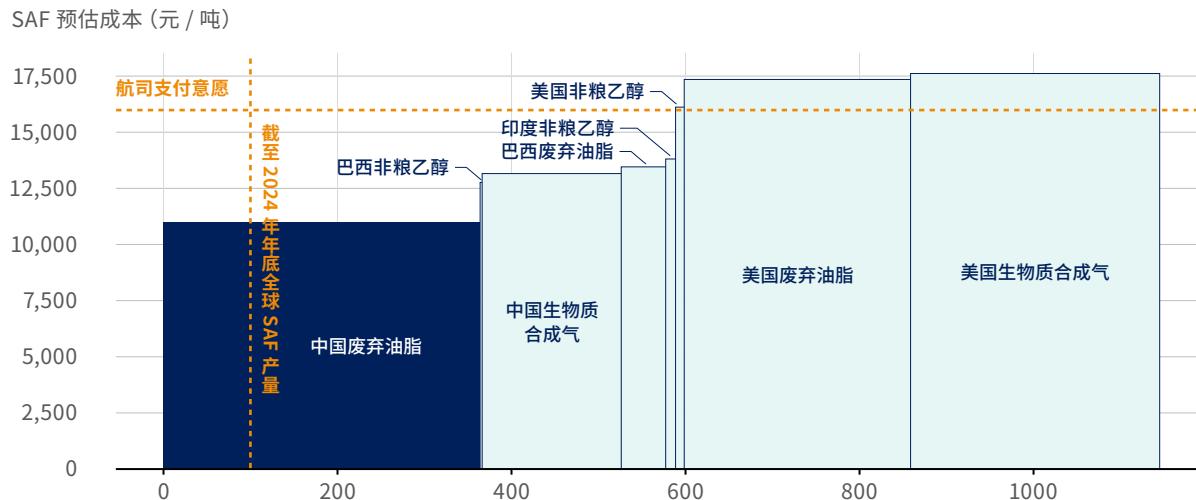
5.3 2030 年全球 SAF 需求预测

SAF 需求主要受到生产成本和政策目标及法规要求两方面的影响，其中生产成本的影响更为显著。政策目标和法规要求为 SAF 需求设定了基线，可以据此估算 SAF 需求的最小值，而成本的变动则决定了需求在此基线之上的浮动空间。不过，过往经验也证明，当成本和供给不及预期时，政策仍然可以放宽约束、推迟目标，因此归根结底，全球 SAF 推广需要建立在 SAF 成本下降的基础之上。

若完全取信各国 / 机构的政策目标并结合航司已公布的自主需求，欧盟强制要求政策将会带来 SAF 需求约 280 万吨，巴西、印度、日本、英国等国也出台了 SAF 使用目标，这些国家综合 SAF 需求也将达到 300 万吨左右。结合航司已公布的近 1400 万吨 / 年 SAF 的自主需求，据此估计，2030 年时全球 SAF 需求将超过 1900 万吨。

从成本角度来看，持续的贸易摩擦和全球原材料进出口的收紧有可能给 SAF 成本带来更多的不确定性，进而可能影响需求。由于 SAF 成本主要和原材料相关，CAPEX 和 OPEX 成本相对次要，因此为了简化分析，此处列出本研究涉及的四个国家 2030 年各主要原料的预估生产成本及其总产能潜力。

图表 54 2030 年全球主要原料的 SAF 产能潜力及成本估计



当前，HEFA-SAF 的产量占据全球 SAF 总产量的 90% 以上，且很大程度上依托于中国提供的 UCO 原材料。根据 RMI 此前针对北美地区 23 家 SAF 买家企业（包括航司、物流承运商、以及范围三企业等）的调研，对于减排 75% 的 HEFA-SAF，企业的平均额外支付意愿为 2.96 美元 / 加仑（约 7000 元 / 吨），既企业愿意为 HEFA-SAF 付出大约 16000 元 / 吨的价格，¹¹⁶ 据此判断，来自中国、巴西和印度的廉价原材料将是未来一段时间内的主要来源，而美国的原材料生产成本较高，大幅超出了当前航司的支付意愿。

六、主要结论与建议

6.1 预计到 2030 年前，HEFA 仍将主导 SAF 市场。GFT、AtJ 等下一代技术路线若要实现快速突破，需依赖于更为完善的上游产业链建设和有力的政策支持

尽管 AtJ、GFT、MtJ 等技术路线在未来具备巨大的产能潜力，但就当前而言，其发展面临多重挑战。具体表现为：一是配套基础设施和产业链建设滞后，二是高昂的生产成本制约了其商业化进程。综合研判，在当前阶段，通过 HEFA 技术路线生产的 SAF 凭借其技术成熟度和成本优势，能够有效满足短期内的市场需求增长。因此，预计到 2030 年前，全球 SAF 市场仍将由 HEFA 技术主导。

从长远看，纤维素 / 木质素生物质原料在总量上远超废弃油脂，在 HEFA 技术路线产能达到瓶颈后，其他技术路线的市场份额将逐步提升。然而，考虑到短期内全球 SAF 需求增速及市场规模均相对有限，HEFA 技术路线在经济性上仍具吸引力。相较之下，AtJ 和 GFT 等技术路线由于产业链条较长、生产成本较高，其大规模商业化进程仍需时日。

生产流程的复杂性决定了产业链培育的长期性。尽管当前全球（尤其是美国）已大量规划 AtJ 产能，总规划产能超过 250 万吨，但上游纤维素乙醇设施的规划却明显滞后，其规划产能总量尚不及 AtJ 总规划产能的 10%。这一结构性失衡可能导致美国本土 AtJ 产业初期主要依赖粮食乙醇作为原料。值得注意的是，美国特朗普政府的《大而美法案》放宽了对间接土地利用变化（ILUC）碳排放的要求，这或将进一步刺激以玉米等农作物为原料的 SAF 产量快速增长。然而，此类 SAF 的碳减排效果存在不确定性，其市场接受度有待观察。

GFT 技术亦面临类似挑战。以中国为例，尽管农林废弃物资源丰富，但其收集难度大、成本高。虽然生物质收集体系已初步建成，但利用农林废弃物生产 SAF 的成本仍将维持在较高水平。例如，中国农业废弃物种类多样、来源分散，从田间地头到工厂需经历收集、分类、转运、预处理等多个环节，且其供给存在季节性波动，这些因素均增加了其应用难度。这解释了为何多年来我国虽积极倡导农废综合利用，但仍面临生物质电厂原料紧缺的困境。不过，随着首批生物质制甲醇 / 航煤项目的开工建设，预计将有效盘活闲置农林废弃物资源，进而促进 SAF 产业的健康发展。

此外，偏高的生产成本也阻碍了资本的投资意愿，制约了产业发展进度。GFT 和 AtJ 技术路线的技术复杂性高于 HEFA，但在成熟的产业链和规模效应形成后，其生产成本有望大幅下降，甚至可能低于 HEFA 技术路线的生产成本。据此前的研究预测，在理想状态下，中国 GFT 的生产成本有望降至 8000-11000 元 / 吨；美国能源部（DOE）也曾评估，若能有效控制原材料成本，AtJ 的生产成本有望低于 HEFA。然而，在当前市场规模有限的背景下，HEFA-SAF 已能满足大部分需求，而投资 GFT 或 AtJ 技术的回报周期相对更长，这使得投资者更为谨慎。

6.2 地缘政治不稳定和市场需求快速增长双重影响，未来 SAF 市场发展不确定性增加，亟需通过更积极的政策引导和技术突破来稳定市场信心

如上文所述，得益于原料总量的提升和产能的快速增加，自 2022 年起全球 SAF 价格持续下降。2025 年初时，全球 SAF 价格已较 2022 年的高点跌去了一半。不过，原料不足的问题和产能需求错配的问题仍然存在，随着全球需求上升和国际贸易环境改变，SAF 市场未来走势将面临更多不确定性。

原料和需求的矛盾是影响价格的最主要因素。欧洲强制性推广 SAF 应用的政策是当前驱动需求增长的最主要因素。随着欧盟 2025 年政策的落实，欧洲市场对于 SAF 的需求将在未来持续增长，并在 2025-2030 年间至少增加 3 倍。但另一方面，SAF 产能（尤其是 HEFA 产能）仍然受到原材料供给的限制。UCO 原料的国际贸易受阻，欧美本土材料成本较高，除非新的技术路线能够取代现有的 HEFA 技术路线，并以更低的价格向市场供应 SAF，否则欧美本土生产的 SAF 价格将持续走高。

因此，稳定的全球贸易环境是 SAF 成本稳定的基石。SAF 产业发展需要原材料、产能和需求三方面共同配合，单一国家很难满足所有条件。过去几年中，依赖于有效的全球分工，SAF 产业一直保持高速的发展态势，但自 2024 年起，这一模式不断受到政策挑战。在现行政策下，欧洲尚未对 SAF 成品的进口设置壁垒，但未来仍存在这种可能性。如果 SAF 全球市场逐步分裂，则可能出现各区域自产、自用的局面。这将对我国当前高度依赖国际市场的 SAF 产业带来高度不确定性。在此背景下，政策制定者应在平衡价值链各环节需求的同时，着手培育国内 SAF 市场，通过持续并扩大掺混试点并逐步扩大规模、针对下一代 SAF 生产技术实施产业攻关及扶植措施，释放清晰而稳定的政策信号，以增强企业预期并稳固产业发展的信心。

6.3 在资源禀赋、生产能力、技术积累及市场需求等多个维度上，中国在生物质可持续航空燃料领域具备显著优势，有望为全球 SAF 产业和技术发展注入新动能。应进一步推动原料富集区收储运一体化示范建设及产学研一体的多元化技术发展战略，促进生物质 SAF 成本进一步优化

在本文研究的全球主要生物质 SAF 样本国家中，中国凭借丰富的生物质原材料资源和完善的化工产业体系，在 SAF 生产成本和潜在生产规模方面均处于优势地位。随着未来几年中国生物质 SAF 产能的逐步上线投产，其在全球 SAF 市场中的重要性将持续提升。

当前，中国及其他亚洲国家的废弃食用油（UCO）是全球 SAF 生产的主要原材料。过去，全球各国对该原料的竞争尚不激烈。然而，随着 2025 年至 2027 年间全球大量规划产能的集中投产，相应的 UCO 需求也将大幅增加。若再叠加各国政策端对 UCO 原料出口的限制，全球 SAF 产业链将进一步加速调整。在此背景下，中国凭借其强大的科研实力、生产能力和巨大的内部市场，有望为全球 SAF 产业和技术发展注入新动能，使其成为全球 SAF 产业发展的重要驱动力。

上述论断的一个重要例证体现在：在 HEFA 技术路线之外，全球其它 SAF 生产技术路线的产业化进程中，中国的 GFT 技术最接近大规模量产应用。中国已规划一批以生物质气化合成气为主要原料的生物质 SAF 产能，并计划在 2030 年前逐步上线投产。尽管短期内 GFT 路线所产 SAF 的成本偏高，但得益于中国完整成熟的工业体系，极具竞争性的建设和运行成本，结合中国在原材料总量和价格上的优势，在全球 SAF 需求持续提升的背景下，GFT 路线产能将成为 HEFA 之外的重要补充。相比之下，巴西和美国等国大力发展的以传统农作物为原料的生物质 SAF 产业，因其可持续性争议，预计其市场将主要局限于本土，难以在全球范围内形成大规模供给。

鉴于我国丰富多样的生物质资源禀赋以及当前生物质 SAF 技术产业化所面临的瓶颈，本研究建议：应制定多元化的生物质 SAF 技术发展战略，统筹利用废弃油脂、农林废弃物和城市固废等资源，在生物质原料富集区，建设收集 - 储运 - 预处理 - 运输一体化先行示范区，引导资源合理配置；同时，建设联合产业链上下游的产学研一体化的技术攻关平台，打通多元化技术路线发展的堵点，助力生物质 SAF 生产成本的进一步优化。

6.4 大力发展 SAF 产业，不仅是推动中国航空业实现节能减排的重要举措，更是新时代下促进经济高质量发展、带动社会就业的新引擎

中国 SAF 产业规模的持续扩大，在推动航空业低碳转型的同时，也有望为国内经济创造新的增长点并带动大量就业机会，进而促进社会的高效稳定发展。

根据本研究测算，中国到 2030 年的生物质 SAF 产能潜力有望达到 600 万吨 / 年，按每吨 1.6 万元计，总价值将达到 960 亿元人民币。考虑到生物质 SAF 产业链（包括原材料收集、中间商集成、生产加工和终端销售）的产业放大效应，其对国内生产总值（GDP）的贡献放大多倍。

除了直接的经济价值贡献外，SAF 产业还能有效带动上下游就业，并促进乡村振兴。例如，利用秸秆生产 SAF 有望解决秸秆处理难题，同时实现农民增收，助力农村的低碳公平转型。据估计，每通过 GFT 技术生产一吨 SAF，即可为农村带来至少 1200 元的额外收入。此外，GFT、AtJ 等新型技术路线的推广应用，还将在原材料处理、设备制造、投资和生产等环节创造多类就业机会。根据中国近年经济数据统计，每 1% 的 GDP 增长可创造 120 万至 200 万个就业岗位，据此推算，生物质 SAF 产业有望创造约 30 万至 40 万个就业岗位。

6.5 搭建 SAF 可持续性认证机制，并与国际主流标准深度衔接，有助于充分发挥中国 SAF 生产能力的优势，有效拓展国际市场

在中国从原材料供应国向 SAF 供应和消费国转型的关键时期，搭建并完善 SAF 可持续性标准和认证机制，实现与国际主流标准的协同发展，具有重要战略意义。在机制建设过程中，应确保认证数据的真实性与透明度，建立完善的检测体系，并实现全流程可追溯，以提升认证公信力，并为后续政策实施提供有力支撑。

成熟的可持续性标准和认证机制是激励 SAF 生产与应用的根本保障，能有效扩大国内市场需求、加快供给规模化。明确且可执行的认证规则以及标准化的产品是市场健康发展的基础。中国 SAF 市场尚处于起步阶段，随着更多市场主体进入，完善的标准与认证体系将有助于夯实市场基础，促进 SAF 产业健康有序发展。

此外，从总量上看，全球 SAF 主要消费市场仍集中在欧美，因此，在 2030 年前，出口仍是国内生产商的主要销售渠道。当前，国内企业出口需满足欧盟或其他机构的可持续性标准并接受其认证核查，这增加了额外成本和难度。为减轻企业负担、降低出口壁垒、有效对接国际市场，中国应积极参与国际 SAF 相关标准的制定并促进中国标准与国际主流标准的对接。提升中国在全球航空业低碳转型中的话语权。

国内 SAF 标准制定工作已经启动，2024 年发布的征求意见稿为可持续性评价奠定了基础。在此基础上，建议中国设置分等级、分市场的可持续性标准与认证流程，推进国内标准体系与国际市场的对接与互认。此举可帮助企业实现“一次认证、多地销售”，减轻成本与负担，在有效支撑国内市场建设的同时，保持出口的灵活性。

6.6 加速 SAF 产业布局应坚持政策与市场双轮驱动，通过明确的政策信号增强投资者信心，并运用价格、财税和基金等手段形成成本分担机制，引导产业良性发展

为加快可持续航空燃料（SAF）产业发展，中国应充分发挥政策的引导作用，通过财税支持等手段增强投资者信心，有效降低企业初期投入风险。此外，还应构建一套完善的价格疏导机制，让产业链上下游及终端客户共同分担成本，从而有效降低单一环节的负担。

对此，中国可运用多元化的财税激励和金融工具支持产业发展。例如，可对 SAF 生产企业提供税费减免或专项补贴；同时，可设立国家级 SAF 产业创新基金，重点支持技术研发、示范项目及产业链关键环节，以降低技术成本并提升国产化水平。

此外，还可通过绿色金融工具引导社会资本参与，作为政府资金的有效补充。例如，鼓励金融机构为 SAF 项目提供低息贷款或风险分担机制，并支持企业发行绿色债券，以降低融资成本，最终形成“政策引导 + 市场运作”双轮驱动的良性投资环境。

6.7 推进创新交易模式，盘活市场并带动本土 SAF 消费与生产积极性，是助力中国可持续航空燃料市场腾飞的重要催化剂

目前，生物质可持续航空燃料（SAF）产业尚处于发展初期。为促进其加速发展，需同步兼顾降低生产端成本与提高消费端吸引力。本研究认为，可借鉴我国新能源汽车推广初期的成功经验，采取相似的产业扶持政策，具体分两个阶段实施。

在市场发展初期，以 SAF 的实际消费量为依据，对生产企业给予财政扶持或税收减免。此举既能确保生产者获得直接的财政激励，又能通过价格优惠的形式有效传导至下游消费者。随着产业成熟，将 SAF 纳入碳市场交易范围和核查机制，以法规引导激活国内需求，鼓励生产者进行技术迭代，并逐步向市场化激励过渡，支持航空公司与生产商签署长期供应协议。航空公司自身也可以推出面向企业客户或个人旅客的“低碳航班”等产品，进一步分担 SAF 使用成本，最终推动航空业的低碳转型。

此外，账面加注（Book & Claim）等创新交易模式参与 SAF 交易也能够有效降低 SAF 交易成本，帮助 SAF 实现跨地区交易。账面加注交易模式是一种基于监管链（Chain of Custody）的交易模式，用证券化产品代替实体 SAF 交易，以此实现环境权益与实体燃料的分离，因此 SAF 交易不再受到物理分离、物流成本、产业链条的限制，在降低成本的同时帮助终端企业客户减少范围三碳排，进而允许更多的买家参与市场。账面加注模式 2023 年率先由 SAFC Registry 应用于 SAF 市场，2025 年 3 月，空客与 RSB 也联合推出了账面加注平台 Airbus Book & Claim Demonstrator（简称“ABCD”），该平台目前得到了三井住友银行航空资本（SMBC Aviation Capital）、AerCap 等合作伙伴的支持。¹¹⁷ 目前这一模式目前主要应用于自愿减排市场，未来可能逐步得到欧盟等合规市场的认可。在中国推广账面加注模式能够减少国际 SAF 出口成本，降低 SAF 国际市场交易难度。

附录1

中国生物质SAF项目汇总（截至2025年4月）

	生产商	位置	技术路线	总产能规划 (吨/年)	投产日期
1	中国石油化工股份有限公司镇海炼化分公司	浙江宁波	HEFA	35,000	2021
2	易高环保能源科技（张家港）有限公司	江苏张家港	HEFA	210,000	2022
3	河南君恒实业集团生物科技有限公司	河南濮阳	HEFA	151,200	2023
4	浙江嘉澳环保科技股份有限公司	江苏连云港	HEFA	350,000	2024
5	河北飞天石化集团有限公司	河北辛集	HEFA	20,000	2024
6	盘锦鹏鹞生物能源有限公司	辽宁盘锦	HEFA	60,000	2024
7	山东海科化工集团有限公司	山东东营	HEFA	210,000	2024
8	北京海新能源科技股份有限公司	山东日照	HEFA	200,000	2025
9	河南君恒实业集团生物科技有限公司	河南濮阳	HEFA	532,000	未投产
10	连云港荷润化工有限公司	江苏连云港	HEFA	60,000	未投产
11	蓝鲸生物能源（浙江）有限公司	浙江嘉兴	HEFA	180,000	2025
12	四川天舟通用航空科技有限公司	四川威远	HEFA	130,000	2026
13	四川金尚环保科技	四川遂宁	HEFA	210,000	2026
14	思科元（高瓴资本 & 厦门建发）	海南儋州	HEFA	195,000	2026
15	龙岩卓越新能源股份有限公司（卓越新能）	福建龙岩	HEFA	80,000	2026
16	河北慧源化工科技有限公司	河北黄骅	HEFA	80,000	未投产
17	上海翔威新能源科技有限公司	上海	HEFA	/	/
19	广西自贸区川桂临港新能源有限公司	广西钦州	HEFA	180,000	2026
20	广西自贸区宏坤生物质燃料有限公司	广西钦州	HEFA	210,000	2027
21	深圳市朗坤环境集团股份有限公司	河北黄骅	HEFA	140,000	2028
22	北京首钢朗泽科技股份有限公司（首钢朗泽）	内蒙古包头	AtJ	50,000	2027
23	远景能源	广东	AtJ	50,000	2026
24	中国石油天然气股份有限公司华北石化分公司	河北任丘	HEFA	140,000	2026
25	海派集团	辽宁大连	HEFA	140,000	2026
26	河北鑫海化工集团公司	河北黄骅	HEFA	300,000	2026
27	中能亿达（河北）新能源有限公司	河北深泽	HEFA	200,000	2026
28	河南君恒实业集团生物科技有限公司	江苏盐城	GFT	20,000	2027
29	连云港荷润化工有限公司	江苏连云港	HEFA	280,000	未投产
30	中国石化 / 道达尔	天津	HEFA	230,000	2027

	生产商	位置	技术路线	总产能规划 (吨/年)	投产日期
31	中国能建	黑龙江双鸭山	GFT	60,000	2027
32	浙江将蓝生物能源科技有限公司	浙江杭州	HEFA	231,000	2027
33	海峡清能(来宾)化工有限公司	广西来宾	HEFA	210,000	2027
34	国能国华南乐新能源有限公司	河南南乐	GFT	60,000	2028
35	中电工程沈阳生物质绿色醇油基地项目	辽宁康平	GFT	400,000	2030
36	唐山金利海生物柴油股份有限公司	河北曹妃甸	HEFA	210,000	2027
37	中国石油长庆石化	陕西咸阳	HEFA	100,000	2028
38	黑龙江嘉益荣源绿色化工有限公司	黑龙江鸡东	AtJ	35,000	2021
39	中国能建	新疆乌鲁木齐	GFT	200,000	/
40	中国能建	吉林白城	GFT	300,000	/
41	中国能建	吉林吉林	GFT	100,000	/
42	中国能建	内蒙古通辽	GFT	100,000	/
43	中国能建	新疆克拉玛依	GFT	100,000	/
44	中国能建	新疆呼图壁	GFT	100,000	/
45	国家能源集团	河南濮阳	GFT	/	/
46	国家能源集团	吉林双辽	/	/	/
47	岚泽能源	四川泸州	GFT	100,000	2027

附录2

美国生物质SAF项目汇总（截至2025年4月）

	生产商	位置	技术路线	总产能规划 (吨/年)	投产日期
1	AVINA CLEAN HYDROGEN	ILLINOIS	ATJ	343,867	2028
2	CRY SALIX BIOSCIENCES	SAUGET, IL	ATJ	86,307	2027
3	NACERO	PENWELL, TX	ATJ	428,130	2029
4	SKYNRG	WASHINGTON	ATJ	143,278	2029
5	SUGAR VALLEY ENERGY	IMPERIAL VALLEY, CALIFORNIA	ATJ	175,000	2026
6	LANZAJET	SOPERTON, GEORGIA	ATJ	29,000	2024
7	GEVO/NET-ZERO 1	LAKE PRESTON, SOUTH DAKOTA	ATJ	187,245	2026
8	GREEN PLAINS	NEBRASKA	ATJ	387,000	2028
9	LOTUS (SKYNRG, LANZAJET)	PACIFIC NORTHWEST	ATJ	14,000	2027
10	SUMMIT AGRICULTURAL GROUP	TEXAS	ATJ	716,000	2025
11	PAR PACIFIC	HAWAII	CO- PROCESSING	176,412	2025
12	DG FUELS	MINNESOTA	GFT	555,000	2030
13	NORTHWEST ADVANCED BIOFUELS	OREGON	GFT	172,615	2026
14	PATHWAY ENERGY	PORT ARTHUR, TEXAS	GFT	86,307	2029
15	VELOCYS	NATCHEZ, MISSISSIPPI	GFT	100,692	2028
16	DG FUELS	LOUISIANA	GFT	600,000	2028
17	DG FUELS	MAINE	GFT	516,708	2027
18	RAVEN SR	RICHMOND, CA	GFT	51,784	2026
19	NEW RISE RENEWABLES	RENO, NEVADA	HEFA	150,000	2024
20	WORLD ENERGY	PARAMOUNT, CALIFORNIA	HEFA	144,000	2018
21	AZURE	CHERRYVALE, KANSAS	HEFA	389,000	2027
22	PHILLIPS 66	RODEO, CALIFORNIA	HEFA	220,000	2024
23	SANTA MARIA RENEWABLES	TEXAS	HEFA	71,000	2026
24	WORLD ENERGY	PARAMOUNT, CALIFORNIA	HEFA	576,000	2027

	生产商	位置	技术路线	总产能规划 (吨/年)	投产日期
25	WORLD ENERGY	HOUSTON, TEXAS	HEFA	719,228	2025
26	NXT CLEAN FUELS	PORT WESTWARD, OREGON	HEFA	556,800	2026
31	MARQUIS	HENNEPIN, ILLINOIS	ATJ	348,000	2024
32	CASTLEROCK GREEN ENERGY	SHELTON, WASHINGTON	GFT	58,000	2025
33	STRATEGIC BIOFUELS/ SUMITOMO CORPORATION OF AMERICA	COLUMBIA, LOUISIANA	GFT	92,800	2027
34	ALDER FUEL	-	GFT	107,300	2024
36	INDABA RENEWABLE FUELS	CALIFORNIA	HEFA	269,700	2024
37	MONTANA RENEWABLES (CALUMET)	GREAT FALLS, MONTANA	HEFA	87,000	2023
38	AIC ENERGY	WILLIAMNS COUNTY, NORTH DAKOTA	HEFA	290,000	2024
39	READIFUELS	HULL, IOWA	HEFA	-	2024
40	INDABA RENEWABLE FUELS	MISSOURI	HEFA	269,700	2024
41	DIAMOND GREEN DIESEL	PORT ATHUR, TEXAS	HEFA	681,500	2025
42	FIDELIS NEW ENERGY	BATON ROUGE, LOUISIANA	HEFA	1,783,500	2025
43	SHELL	CONVENT, LOUISIANA	HEFA	41,1800	2027

附录3

巴西生物质SAF项目汇总（截止2025年4月）

	生产商	位置	技术路线	总产能规划 (吨/年)	投产日期
1	Brasil BioFuels	Manaus, Brazil	HEFA	202,000	2025
2	Acelen Renewables	Mataripe, Bahia	HEFA	405,000	2026
3	Petrobras	Cubatao, Brazil	HEFA	283,000	2028

附录4

印度生物质SAF项目汇总（截止2025年4月）

	生产商	位置	技术路线	总产能规划 (吨/年)	投产日期
1	ENGINEERS INDIA LIMITED	NUMALIGARH, INDIA	HEFA	5,600	2026
2	INDIAN OIL CORPORATION	MATARIPE, BAHIA	ATJ	88,000	2025

参考文献

- 1 IPCC, “IPCC Sixth Assessment Report”, 2021
- 2 IEA, “Aviation”, 2025
- 3 ICAO, “Environmental Trends in Aviation to 2050”, 2022
- 4 Airbus, “Global Market Forecast 2024”, 2024
- 5 ICAO, “Sustainable aviation fuel”, 2025
- 6 Nafisa Lohawala et al., “Navigating Sustainable Skies: Challenges and Strategies for Greener Aviation”, 2024
- 7 IATA, “Net zero 2050: sustainable aviation fuels”, 2024
- 8 ICAO, “ICAO tracker of SAF facilities”, 2025
- 9 Earth.org, “Sustainable Aviation Fuel: State of the Industry and Challenges in 2024”, 2024
- 10 Green Air, “IATA expects SAF production to rise to 0.5% of airlines’ fuel consumption in 2024, adding \$2.4bn to costs”, 2023
- 11 Airbus, “Airbus and partners invest in SAF financing fund”, 2024
- 12 Airbus, “What is Airbus doing to increase SAF usage?”, 2025
- 13 Kerry Lynch, “Rolls-Royce completes 100 percent SAF testing for in-production engines”, 2023
- 14 EPA, “Renewable Identification Numbers (RINs) under the Renewable Fuel Standard Program”,
<https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/renewable-identification-numbers-rins-under-renewable-fuel-standard>
- 15 U.S. Congress, “H.R.1 – One Big Beautiful Act”, 2025
- 16 Government of UK, “Sustainable aviation fuels initiative”, 2024
- 17 UK Department of Transport, “Sustainable aviation fuel revenue certainty mechanism”, 2025
- 18 CAAS, “Launch of Singapore Sustainable Air Hub Blueprint”, 2024
- 19 ICAO, “Carbon offsetting and reduction scheme for international aviation”, 2025
- 20 IATA, “SAF Registry to be Operated by the Civil Aviation Decarbonization Organization”, 2025
- 21 ICAO, “CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels”, 2022
- 22 EASA, “European Aviation Environmental Report”, 2025
- 23 ICAO, “CORSIA Eligible Fuels – Life Cycle Assessment Methodology”, 2021
- 24 ICAO, “Conversion processes”, 2025
- 25 ICAO, “Conversion processes”, 2025
- 26 ASTM, “ASTM D7566-24d Standard specification for aviation turbine fuels”, 2024
- 27 ASTM, “ASTM D1655-24b Standard specification for aviation turbine fuels”, 2024
- 28 PAN American Finance, “Global SAF Report”, 2025
- 29 EASA, “European Aviation Environmental Report”, 2025
- 30 EASA, “European Aviation Environmental Report”, 2025
- 31 ICAO, “CORSIA Eligible Fuels – Life Cycle Assessment Methodology”, 2021
- 32 EASA, “European Aviation Environmental Report” 2025
- 33 Zhang Zongwei et al., “LCA and TEA analyses of bio-jet fuel prepared from Arundo donax”, 2025
- 34 Zhang Zongwei et al., “LCA and TEA analyses of bio-jet fuel prepared from Arundo donax”, 2025
- 35 EASA, “European Aviation Environmental Report” 2025
- 36 RMI, “SAF Market Outlook”, 2025
- 37 落基山研究所, “航空零碳必由之路——下一代可持续航空煤油技术发展前景”, 2023
- 38 思瀚产业研究院, “废弃油脂资源综合利用行业概况及特点”, 2023
- 39 张鑫, “2025 年中国废弃油脂资源综合利用行业发展现状及竞争格局分析”, 2025

- 40 中国新闻网, “中国耕地布局从南减北增转为南北双增”, 2024
- 41 Wang et al. "A high spatial resolution dataset of China's biomass resource potential", 2023
- 42 人民日报, “人工林保存面积、草地面积居世界第一”, 2025
- 43 Wang et al. "A high spatial resolution dataset of China's biomass resource potential", 2023
- 44 韩晓冉等, “生物质掺烧“煤电联营”商业模式创新及应用研究”, 2024
- 45 Wang et al., "A high spatial resolution dataset of China's biomass resource potential", 2023
- 46 CEIC, “中国生活垃圾清运”, 2025
- 47 山高环能集团, “项目布局”, 2025
- 48 朗坤环境, “与华南中石油签署战略合作框架协议”, 2024
- 49 连云港日报, “国内首条单线年产能 50 万吨级生物航煤项目在连投料成功”, 2024
- 50 山东海科化工有限公司, “公司简介”, 2024
- 51 中国化工信息, “又一上市公司入局可持续航空燃料, 新项目年产 10 万吨 HVO/SAF”, 2024
- 52 鹏鹞环保, “2024 年 8 月完成 SAF 装置升级改造成本 1500 到 3000 元主销欧盟”, 2024
- 53 Statista, “Ethanol production in selected countries”, 2024
- 54 亚化咨询, “蚌埠秸秆糖制生物航煤项目最新进展”, 2025
- 55 新浪财经, “80 亿元! 这个绿氢醇航油化工联产项目开工”, 2025
- 56 岚泽能源, “岚泽费托合成航煤馏分油千吨级中试运行成功”, 2025
- 57 RMI, “SAF Outlook”, 2025
- 58 落基山研究所, “航空零碳必由之路——下一代可持续航空煤油技术发展前景”, 2023
- 59 Hydrocarbon Processing, “U.S. imports of Chinese used cooking oil set for new record, future uncertain”, 2024
- 60 USDA, “US Tall Oil Exports to the Nordics Surge”, 2024
- 61 The Union of Concerned Scientists, “Clean Power and Fuel—If Handled Right”, 2012
- 62 The Union of Concerned Scientists, “Clean Power and Fuel—If Handled Right”, 2012
- 63 The Union of Concerned Scientists, “Clean Power and Fuel—If Handled Right”, 2012
- 64 The Union of Concerned Scientists, “Clean Power and Fuel—If Handled Right”, 2012
- 65 Valero, “Diamond Green Diesel (DGD) Approves a Sustainable Aviation Fuel Project at Port Arthur, Texas”, 2023
- 66 Statista, “Ethanol production in selected countries”, 2024
- 67 Breakthrough Energy, “LanzaJet | Freedom Pines Fuels”, 2025
- 68 Renewable Energy Magazine, “Companies Partner on Large Scale SAF/BECCS Project in Louisiana”, 2024
- 69 Empresa de Pesquisa Energética, “Sustainable Aviation Fuels in Brazil”, 2024
- 70 RSB & Agroicone, “Mapping Feedstock Availability for the Production of Sustainable Aviation Fuels in Brazil”, 2022
- 71 Empresa de Pesquisa Energética, “Sustainable Aviation Fuels in Brazil”, 2024
- 72 RSB & Agroicone, “Mapping Feedstock Availability for the Production of Sustainable Aviation Fuels in Brazil”, 2022
- 73 Empresa de Pesquisa Energética, “Sustainable Aviation Fuels in Brazil”, 2024
- 74 USDA, “Biofuels Annual – Brazil”, 2024
- 75 USDA, “Biofuels Annual – Brazil”, 2024
- 76 USDA, “Biofuels Annual – Brazil”, 2024
- 77 USDA, “Biofuels Annual – Brazil”, 2024
- 78 USDA, “Livestock and Products Annual – 2023”, 2023
- 79 RMI database
- 80 ICAO, “Views on Global Framework on SAF, LCAF and Other Aviation Cleaner Energies, Related Assistance and Finance”, 2023
- 81 USDA, “Biofuels Annual – India”, 2024
- 82 Bioenergy Times, “ESY2024-25: Ethanol blending in petrol reaches record 18.2% in December”, 2025
- 83 USDA, “Biofuels Annual – India”, 2024
- 84 Ministry of New and Renewable Energy, “National Biomass Atlas of India”, 2025
- 85 Deloitte, “Green wings: India’s SAF revolution in the making”, 2024
- 86 USDA, “Biofuels Annual – India”, 2024

- 87** International Trade Administration, “India solid waste management”, 2025
- 88** Indian Express, “SAF blending mandates for domestic flights likely only after global mandates take effect in 2027”, 2024
- 89** S&P Global, “EIL targets 2026 Mangalore SAF refinery launch prioritizing palm stearin”, 2025
- 90** Argus, “India’s IOC plans 1% SAF blending by Jul-Sep 2025”, 2024
- 91** The Global Economy, “India: jet fuel consumption”, 2025
- 92** 隆众资讯, “生物柴油 | 餐厨废油市场: 整体低迷中静待转机出现”, 2025
- 93** 刘文质, “生物质气化费托合成生产航空煤油的生命周期评价及经济性分析”, 2023
- 94** ICAO, “SAF rules of thumb”, 2025
- 95** Argus, “UCO prices pressured amid recordkeeping regulations”, 2023
- 96** ICAO, “SAF rules of thumb”, 2025
- 97** US Department of Energy, “Pathways to Commercial Liftoff: Sustainable Aviation Fuel”, 2024
- 98** Growth energy, “RIN Prices”, 2025
- 99** US Department of Energy, “Pathways to Commercial Liftoff: Sustainable Aviation Fuel”, 2024
- 100** Lux Research, “Cellulosic Ethanol Price Hinges on Feedstock Cost”, 2016
- 101** US Department of Energy, “Pathways to Commercial Liftoff: Sustainable Aviation Fuel”, 2024
- 102** Adani, “India coal gasification overview”, 2022
- 103** TRIDGE, “Price for beef tallow in India”, 2025
- 104** Buyofuel, “What determines UCO price in India”, 2024
- 105** World Economic Forum and McKinsey & Company, “Deploying sustainable aviation fuels at scale in India”, 2021
- 106** Buyofuel, “How Bagasse Price in India is Shaped by Key Market Forces”, 2024
- 107** Priyabrata Pradhan et al., “Economic feasibility of agro waste pelletization as an energy option in rural India”, 2019
- 108** World Economic Forum and McKinsey & Company, “Deploying sustainable aviation fuels at scale in India”, 2021
- 109** S&P Global, “CHINA DATA: 2024 UCO exports hit all-time high on demand from US, EU, Singapore”, 2025
- 110** USDA, “China UCO Trade Update”, 2025
- 111** Biofuels International, “China’s UCO exports to US plunge amid new tariffs”, 2025
- 112** S&P Global, “CHINA DATA: 2024 UCO exports hit all-time high on demand from US, EU, Singapore”, 2025
- 113** Argus, “Waste-based biofuel feedstock prices at multi-year high”, 2025
- 114** Reuters, “Indonesia curbs exports of used cooking oil, palm residue to help domestic users”, 2025
- 115** S&P Global, “EU finalizes antidumping duties on biofuels, starts tracking SAF imports”, 2025
- 116** RMI, “Unraveling Willingness to Pay for Sustainable Aviation Fuel”, 2024
- 117** Airbus, “Airbus accelerates Sustainable Aviation Fuel (SAF) adoption with book and claim”, 2025

引领航空航天业可持续发展，
让世界更安全，联结更紧密

扫码了解更多



AIRBUS